

**UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID**



# **ANÁLISIS NUMÉRICO DE IMPACTOS A BAJA VELOCIDAD CONTRA LAMINADOS DE TEJIDO DE MATERIAL COMPUESTO**

---

**GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA**

**Departamento de Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras**

ALUMNO: IVÁN LEÁN BACHILLER

TUTORES: JOSÉ ALFONSO ARTERO GUERRERO

JESÚS PERNAS SÁNCHEZ

TRABAJO FIN DE GRADO

LEGANÉS, JUNIO 2017



## ÍNDICE

ÍNDICE DE FIGURAS .....	5
ÍNDICE DE TABLAS.....	7
1. INTRODUCCIÓN .....	8
1.1 MOTIVACIÓN .....	9
1.2 OBJETIVOS .....	10
1.3 CONTENIDO .....	11
2. ANTECEDENTES .....	13
2.1 MATERIALES COMPUESTOS .....	14
2.1.1 MATRIZ .....	15
2.1.2 REFUERZOS.....	16
2.1.3 TIPOS DE LAMINADOS .....	20
2.2 APLICACIONES .....	23
2.3 ENSAYOS DE IMPACTO .....	29
2.3.1 IMPACTOS A BAJA VELOCIDAD .....	30
2.3.2 IMPACTOS A ALTA VELOCIDAD .....	32
2.3.3 ENSAYOS EXPERIMENTALES.....	33
2.3.4 SIMULACIONES NUMÉRICAS .....	36
3. MODELIZACIÓN DEL IMPACTO.....	39
3.1 INTRODUCCIÓN A LA MODELIZACIÓN .....	40
3.2 GEOMETRÍA.....	40
3.3 MATERIALES.....	45
3.4 INTERACCIONES .....	58
3.5 CONDICIONES DE CONTORNO .....	59
3.6 MALLADO .....	61

3.7	CONDICIONES DE SIMULACIÓN.....	62
4.	RESULTADOS .....	64
4.1	INTRODUCCIÓN A LOS RESULTADOS .....	65
4.2	ANÁLISIS DE VARIABLES .....	65
5.	CONCLUSIONES.....	75
6.	TRABAJOS FUTUROS.....	78
7.	BIBLIOGRAFÍA.....	80

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1:</b> Aplicación de fibra de carbono en chasis de vehículo.....	9
<b>Figura 2:</b> Comparación de las características específicas de diferentes fibras [2]. .....	15
<b>Figura 3:</b> Microestructura de matriz de aluminio con refuerzos de partículas de TiB <sub>2</sub> y de B <sub>4</sub> C [5] .....	17
<b>Figura 4:</b> Laminado unidireccional [7].....	20
<b>Figura 5:</b> Laminado ortótropo [6]. .....	21
<b>Figura 6:</b> Laminado cuasi-isótropo [7].....	21
<b>Figura 7:</b> Laminado simétrico .....	22
<b>Figura 8:</b> Lámina de tejido tafetán [6].....	23
<b>Figura 9:</b> Porcentaje de materiales compuestos en industria aeronáutica. ....	24
<b>Figura 10:</b> Estructuras y componentes en materiales compuestos para helicópteros....	25
<b>Figura 11:</b> Contribución de materiales plásticos, reforzados o no, al diseño de diferentes componentes y sistemas de un automóvil [9].....	26
<b>Figura 12:</b> Tableros fabricados con FRP [10]. .....	26
<b>Figura 13:</b> Pasarelas de Aberfeldy y Pontresina.....	27
<b>Figura 14:</b> Primer puente híbrido construido en EEUU [10]. .....	28
<b>Figura 15:</b> Lanzadera Ariane V.....	29
<b>Figura 16:</b> Torre de caída libre. ....	30
<b>Figura 17:</b> Orientación y forma de las delaminaciones [12]. .....	32
<b>Figura 18:</b> Efecto de la velocidad en la respuesta del laminado de fibra de carbono en resina polimérica [16]. .....	33
<b>Figura 19:</b> Torre de caída de la Universidad Carlos III.....	35
<b>Figura 20:</b> Útiles empleados en ensayos en torre de caída de la Universidad Carlos III [27].....	36
<b>Figura 21:</b> Modelo del proyectil impactador. ....	42
<b>Figura 22:</b> Modelo de una lámina.....	43
<b>Figura 23:</b> Imagen y detalle del modelo completo. ....	45
<b>Figura 24:</b> Constantes del material compuesto elegido.....	52
<b>Figura 25:</b> Curva de tracción separación de elementos cohesivos [30].....	55
<b>Figura 26:</b> Interacción entre cohesivo y lámina. ....	59

<b>Figura 27:</b> Detalle interacción cohesivo y lámina. ....	59
<b>Figura 28:</b> Representación del movimiento del impactador. ....	60
<b>Figura 29:</b> Representación de las condiciones de contorno en el laminado. ....	61
<b>Figura 30:</b> Mallado del conjunto .....	62
<b>Figura 31:</b> Área delaminada para el proyectil de 3,8 kg.....	66
<b>Figura 32:</b> Área delaminada para el proyectil de 7,8 kg.....	66
<b>Figura 33:</b> Área delaminada para el proyectil de 15,8 kg.....	67
<b>Figura 34:</b> Representación resultados Fuerza Máxima. ....	69
<b>Figura 35:</b> Representación desplazamientos verticales máximos del laminado tras el impacto. ....	71
<b>Figura 36:</b> Representación del COR para cada uno de los casos de estudio.....	73
<b>Figura 37:</b> Tiempo de contacto entre el impactador y el laminado. ....	74

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1:</b> Propiedades de los tipos de fibra de vidrio [2].....	18
<b>Tabla 2:</b> Comparación de propiedades de los tipos de refuerzos por fibras. ....	19
<b>Tabla 3:</b> Datos volúmen, densidad y masa del impactador. ....	42
<b>Tabla 4:</b> Propiedades acero impactador.....	45
<b>Tabla 5:</b> Propiedades del material compuesto en la línea 1.....	52
<b>Tabla 6:</b> Propiedades del material compuesto en la línea 2.....	53
<b>Tabla 7:</b> Propiedades del material compuesto en la línea 3.....	53
<b>Tabla 8:</b> Propiedades del material compuesto en la línea 4.....	53
<b>Tabla 9:</b> Propiedades del material compuesto en la línea 5.....	54
<b>Tabla 10:</b> Propiedades del elemento cohesivo.....	58
<b>Tabla 11:</b> Condiciones de impacto para cada uno de los proyectiles. ....	63
<b>Tabla 12:</b> Resultados Fuerza Máxima. ....	68
<b>Tabla 13:</b> Desplazamientos verticales máximos del laminado tras el impacto. ....	70
<b>Tabla 14:</b> Datos energía disipada y COR para cada uno de los casos de estudio.....	72
<b>Tabla 15:</b> Tiempo de contacto de cada impacto. ....	74

# 1. INTRODUCCIÓN



## 1.1 MOTIVACIÓN

El estudio de los materiales en la ingeniería siempre ha sido uno de los principales temas de análisis en el diseño y la fabricación. Resulta evidente que cuanto mejores sean las propiedades de los materiales para las condiciones de trabajo a las que se van a someter, mayor será el rendimiento de la estructura o producto a utilizar. Es por ello por lo que continuamente se analizan nuevas técnicas o nuevos materiales que optimicen y maximicen su efectividad en cualquier tarea.

En la actualidad, diferentes industrias incorporan materiales continuamente. Un ejemplo es la industria aeronáutica, en cuyo caso es especialmente importante controlar todas las variables que disminuyan costes; el uso de materiales con similares propiedades mecánicas y un menor peso fomentará un ahorro de combustible. Otro caso es la industria del automóvil, en la que a menudo se están desarrollando nuevas prestaciones y pretende lograr una innovación en cada modelo. En la Figura 1 se tiene un ejemplo de la aplicación de la fibra de carbono en carrocerías y chasis de los vehículos.



Figura 1: Aplicación de fibra de carbono en chasis de vehículo.

En el ámbito de la competición, los materiales compuestos son cada vez más utilizados, en busca de ligereza en combinación con buenas propiedades mecánicas. Su máximo exponente es la Fórmula 1, cuyos monoplazas presentan también gran porcentaje de su carrocería fabricado en fibra de carbono.

Este continuo estímulo ha impulsado a utilizar cada vez más los materiales compuestos. Se definen como una mezcla de dos o más materiales distintos con una interfase. Esta combinación hace posible alcanzar ciertas propiedades que no podrían proporcionarnos metales, cerámicos o polímeros por separado. Existen multitud de mezclas y materiales compuestos, dependiendo de la forma en la que están reforzadas (partículas, fibras...) o su matriz (cerámica, metálica, polimérica...)

Sin embargo, a pesar de sus excelentes propiedades, su principal desventaja es la reducción de su resistencia frente a impactos perpendiculares al tejido. La mayoría de las veces el daño producido no es apreciable visiblemente, lo que no quiere decir que no afecte a sus propiedades mecánicas. De esta manera, es preciso realizar un análisis simulando este tipo de impactos, para de esta manera estudiar cuál es el espesor adecuado en la construcción de prototipos de material compuesto, además de ser un buen método para comprender mejor el problema en lo que se conoce como virtual testing.

## 1.2 OBJETIVOS

El principal objetivo del presente trabajo es el análisis numérico de impactos a baja velocidad sobre placas de material compuesto. Este estudio se podría orientar hacia varias vertientes interesantes, sin embargo se centrará en el análisis de la influencia de la masa que impacta en la muestra para impactos en igualdad energética.

Hasta ahora no se ha llegado a una conclusión aceptada por unanimidad sobre este parámetro. Es cierto que en un ensayo experimental J.A. Artero Guerrero, J. Pernas Sánchez et al [1] defendieron la independencia de la masa en los resultados del impacto. Sin embargo, ellos mismos referencian a Zabala H., Aretxabaleta L. et al [28] por su estudio donde sí destacaban su influencia para impactos equienergéticos. Más adelante se explicarán las diferencias entre ambos estudios.

En este trabajo se va a tratar de ayudar a esclarecer este hecho mediante la simulación numérica. Gracias a ella se podrán asumir similitudes con alguna de las dos

posturas, a pesar de que no se va a tener en cuenta la influencia de la velocidad de deformación.

Los análisis numéricos pueden enfocarse desde dos puntos de vista. Está claro que la mejor manera de realizar análisis la mayoría de las veces es de forma experimental. Sin embargo, en ocasiones requiere unos costes que no se pueden abordar, además de destruir los materiales inutilizándolos para usos posteriores. Por tanto, es fácil asumir la necesidad de recurrir a métodos numéricos y programas de simulación previos al método experimental. Por otro lado, los métodos numéricos pueden utilizarse como demostración de las teorías obtenidas experimentalmente.

En el caso de este trabajo, se va a recurrir a la simulación numérica como medio para la obtención de conclusiones que ayuden a comprender alguno de los estudios realizados previamente.

Para ello será necesario el uso de un programa de simulación numérica. Se utilizará el Método de los Elementos Finitos, y en concreto el software Abaqus. Se utilizarán variables como la fuerza de contacto, el desplazamiento máximo, el área de material dañada o las tensiones a las que está sometido para definir el impacto.

Finalmente se compararán los resultados numéricos obtenidos con otros trabajos tanto experimentales como numéricos.

## 1.3 CONTENIDO

Este proyecto cuenta con un total de 7 capítulos, descritos a continuación.

En el primero de ellos se hace una introducción del trabajo, donde se explica la motivación y los objetivos que se pretenden alcanzar con él, para después dar paso a la explicación de los contenidos de cada capítulo.

En el segundo se lleva a cabo una explicación de los materiales compuestos, con un desarrollo teórico sobre los tipos de laminados, sus composiciones. También se

muestran algunos antecedentes de los materiales compuestos, con las aplicaciones que tienen o han tenido en el mundo industrial. A continuación se pasan a describir los tipos de ensayos de impactos, donde se relatan las principales características de cada uno de ellos y los antecedentes tanto experimentales como numéricos.

El tercer capítulo pertenece a la modelización del impacto en el que se fundamenta este trabajo, con una descripción de las diferentes condiciones adoptadas en ella. Algunos de los principales aspectos tratados son la geometría de simulación, las condiciones de contorno, las cargas aplicadas o el mallado.

En cuarto lugar se expresan todos los resultados obtenidos de todas las simulaciones, con una breve comparación con otros casos que antecederá al capítulo de las conclusiones.

En éste se resumen las principales conclusiones obtenidas a partir de los resultados, y además se expresan las hipótesis planteadas en otros estudios.

El último capítulo propone brevemente trabajos futuros como posibles desarrollos del proyecto aquí llevado a cabo.

El trabajo finaliza con una bibliografía en la que se muestran todas las referencias utilizadas para su desarrollo.

## 2. ANTECEDENTES

## 2.1 MATERIALES COMPUESTOS

Se entiende por material compuesto aquel formado por dos o más componentes, de forma que las propiedades del material final sean superiores que las de los componentes por separado. Es la definición que según Antonio Miravete [2] se rige para todos los materiales compuestos. Pero también añade ciertos requisitos que deben cumplir. Y es que el material compuesto debe ser expresamente fabricado por la mano del hombre, dejando fuera de dicho campo a materiales como los que forman los huesos humanos, las masas arbóreas...

Además, no deben tener continuidad fenomenológica, como por ejemplo los cerámicos. Estas dos condiciones no excluyen al hormigón, puesto que no es un material continuo fenomenológicamente y está construido por la mano expresa del hombre. Sin embargo, no se considera del estudio puesto que es un material clásico en la Ingeniería Civil [2].

Un material compuesto presenta dos elementos principales: fibra y matriz. Además de fibra y matriz, existen otros tipos de componentes como cargas y aditivos que dotan a los materiales compuestos de características peculiares para cada tipo de fabricación y aplicación.

La fibra actúa como refuerzo. Incrementa parámetros como la resistencia mecánica, la rigidez o la dureza, condicionando completamente el material y dotándolo de unas nuevas propiedades mecánicas. Sus características fundamentales son la resistencia a la tracción específica y el alto módulo específico. En la Figura 2 se observa alrededor de qué valores oscilan los módulos específicos y resistencias específicas de las diferentes fibras.

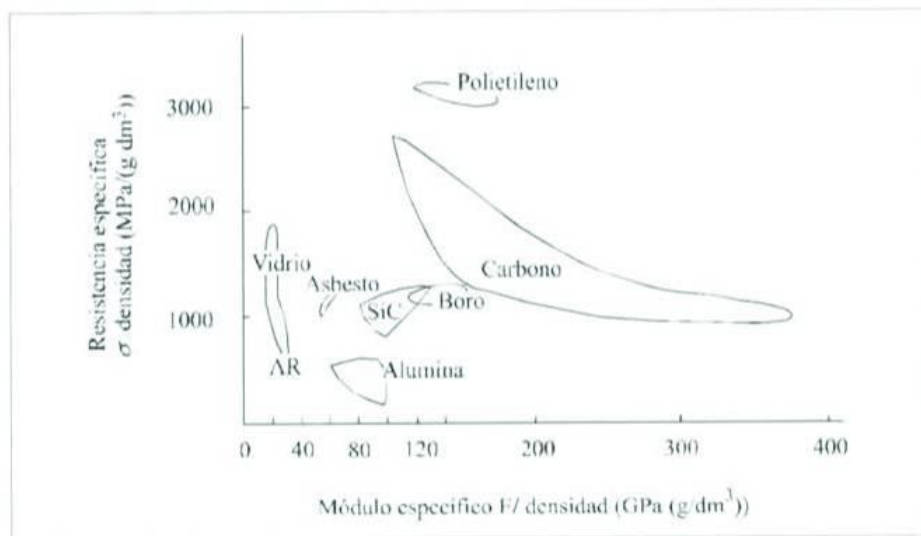


Figura 2: Comparación de las características específicas de diferentes fibras [2].

Por otro lado, la matriz es la encargada de dar la forma geométrica al material compuesto, así como de transmitir los esfuerzos entre las fibras. La gran variedad de ellas hace que hoy en día hablar de materiales compuestos nos haga recorrer un amplio abanico de combinaciones de materiales de fibras y matrices dependiendo en cada caso de la propiedad que se requiere mejorar. A continuación se procederá a realizar un análisis más específico sobre matrices y refuerzos tras esta breve introducción.

### 2.1.1 MATRIZ

La utilización de materiales en forma de fibra sin interacción con cualquier otro tipo de interfase no es directamente empleada en la industria, exceptuando los cables si consideramos estos con propiedades similares a las fibras. La razón es su incapacidad para trabajar a compresión o para soportar esfuerzos transversales. Es por eso por lo que se utilizan las matrices como aglutinantes que transfieran las cargas exteriores a los refuerzos, además de evitar la propagación de grietas. Por lo general, es responsable del control principal de las propiedades eléctricas, el comportamiento químico y el uso a altas temperaturas del material [3].

Existen diferentes tipos de matrices empleadas:

- **Compuesto de matriz metálica (CMM):** Incluyen aluminio, magnesio, cobre, níquel y aleaciones de compuestos intermetálicos. Mediante su uso se cubren diferentes aplicaciones del sector aeroespacial y de la automoción. Una de sus principales ventajas es la capacidad para trabajar a altas temperaturas, así como su ductilidad. Sin embargo, su afinidad con el oxígeno hace que su utilización sea replanteada en diversas situaciones en las que existe riesgo de corrosión.
- **Compuesto de matriz cerámica (CMC):** El uso de materiales cerámicos sorprendentemente para las matrices está también relacionado con la temperatura. Presentan buenas propiedades a altas temperaturas, y además son más ligeros que los materiales metálicos utilizados en el caso anteriormente descrito [4].
- **Compuesto de matriz polimérica (CMP):** Son las más comúnmente utilizadas. Generalmente se combinan con fibras cortas de vidrio. Utilizan tanto polímeros termoestables como termoplásticos, posibilitando así clasificarlas según dichos polímeros. Dentro de las termoestables, se encuentra el epoxi o el poliéster por ejemplo. Se emplean resinas formadas mediante transformaciones químicas irreversibles, lo que genera la propia matriz entrecruzada. Las propiedades dependen de los monómeros, pero todas siguen un mismo patrón que comprende una baja viscosidad, ductilidad y estabilidad térmica, resistencia a la corrosión y al agua. Las resinas epoxi son utilizadas debido a su mayor tenacidad dentro de la fragilidad que presentan las matrices, mientras que el poliéster manifiesta peores propiedades pero su precio es mucho menor. Como termoplásticos es de gran utilidad el polipropileno.

### 2.1.2 REFUERZOS

El refuerzo puede ser en forma de partícula o en forma de fibra. Como norma general, es más efectivo cuanto menor es su tamaño y mayor es su homogeneidad en la matriz, aunque también depende de cómo de elevada es la relación longitud/diámetro de



la fibra. Aunque existe gran cantidad de materiales compuestos reforzados por partículas, la mayoría son aquellos que emplean fibras. Además de la relación longitud/diámetro, se deben tener en consideración otros factores como la cantidad de fibras, su orientación o sus propiedades. A continuación se exponen algunas de las características de ambos tipos de refuerzos.

- **Refuerzos por partículas:** contienen grandes cantidades de partículas gruesas que no bloquean el deslizamiento con eficacia. Estos compuestos están normalmente fabricados para obtener una combinación de propiedades específica o poco usual, y no para mejorar la resistencia. Además, la distribución de las diferentes partículas sobre la matriz genera un comportamiento o una distribución de sus propiedades isotrópica, efecto no conseguido mediante el uso de fibras. En la Figura 3 se tiene un ejemplo.

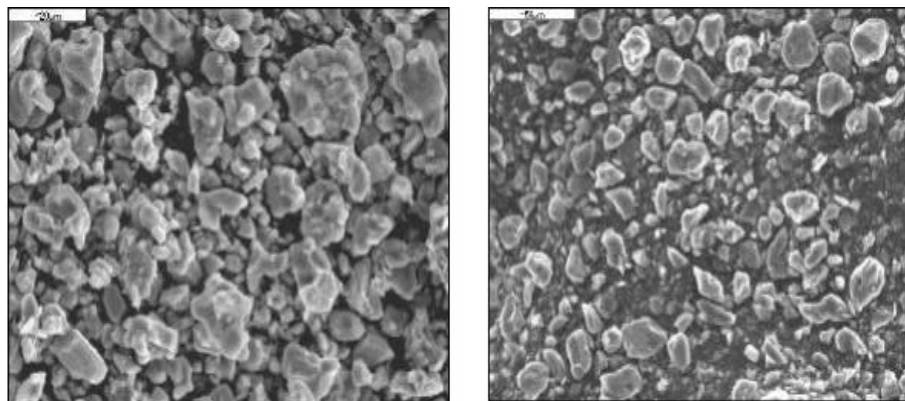


Figura 3: Microestructura de matriz de aluminio con refuerzos de partículas de  $TiB_2$  y de  $B_4C$  [5]

- **Refuerzos por fibras de vidrio:** Tienen un bajo coste y buenas propiedades mecánicas. Entre sus características más destacables se encuentran una alta resistencia mecánica específica, incluso mayor que la del acero. Es buen aislante eléctrico debido a su permeabilidad eléctrica y magnética, además de su bajo coeficiente de dilatación térmica que provoca una gran estabilidad dimensional al ser poco sensible a los cambios térmicos. Es un material incombustible, por lo que no propaga la llama y presenta gran estabilidad química [6]. Existen

diferentes tipos de fibras de vidrio, pero a continuación se explican los cuatro tipos de fibra más característica, con base de sílice.

- Fibras de vidrio tipo E: Coste moderado para las buenas propiedades eléctricas que posee. Es la más utilizada.
- Fibras de vidrio tipo R o S: Se emplea en estructuras que requieren buenas propiedades mecánicas, como en la industria aeronáutica. Gran resistencia a tracción y mejor módulo de elasticidad que las otras fibras.
- Fibras de vidrio tipo D: Se utilizan en materia tecnológica, debido a su poca pérdida eléctrica.
- Fibras de vidrio tipo A: Es menos resistente que el E, pero tiene gran resistencia química.

TIPO	VIDRIO A	VIDRIO E	VIDRIO S	VIDRIO R
Densidad [ $\text{kg/m}^3$ ]	2500	2580	2480	2590
Módulo Elasticidad [MPa]	69	72,5	86	85
Resistencia a tracción [GPa]	3,1	3,4	4,59	3,4-4,4
Diámetro de hilo [ $\mu\text{m}$ ]	5-13	10-20	10	10
Coefficiente de expansión térmica [ $10^6/^{\circ}\text{K}$ ]	8,6	5	5,1	5

Tabla 1: Propiedades de los tipos de fibra de vidrio [2]

- **Refuerzos por fibra de aramida:** Son fibras de origen orgánico y sintético, que derivan del hilado de un polímero (poliamida aromática de tipo politereftalato de polifenilendiamina). Este tipo de fibras presenta una alta resistencia y rigidez obtenida a partir de polímeros alineados. Su mayor problema es la resistencia a compresión. Otras características son su alto módulo de elasticidad y baja

elongación a rotura, su buena estabilidad mecánica desde -30°C hasta 200°C, gran tenacidad debido a su capacidad para absorber energía. Sin embargo, además de sus bajas prestaciones en la compresión, presentan dificultades para adherirse a las matrices, problemas en la fotodegradación y una disminución de sus propiedades en ambientes relativamente húmedos.

- Refuerzos por fibra de carbono:** La fibra de carbono es muy utilizada en aplicaciones donde se requiere un buen comportamiento a fatiga o en condiciones en las que, bajo condiciones estáticas, es necesario un buen comportamiento mecánico. Su coste de fabricación es mayor que el de otras fibras como las de vidrio; sin embargo, en los últimos tiempos se está viendo reducido debido al incremento de la demanda en industrias importantes como la aeronáutica, transporte terrestre, marina, deporte... [6].

Entre sus características más importantes se encuentra su baja densidad, favoreciendo una relación propiedades mecánicas – peso elevada. Presenta alta resistencia a la fatiga, a la corrosión y alta conductividad eléctrica. Además, su bajo coeficiente de dilatación térmica provoca una gran estabilidad dimensional.

En la Tabla 2 se comparan los tres tipos de fibras descritos anteriormente, particularizando para las fibras de vidrio las de tipo E puesto que, como se ha indicado, son las más utilizadas.

Propiedad	Vidrio E	Fibra de Carbono	Fibra de aramida
$\sigma_t$ [MPa]	3400	3100	3617
Módulo Elasticidad [MPa]	72,5	220	124
% elongación hasta rotura	3,5	1,4	2,5
Densidad [gr/cm <sup>3</sup> ]	2,58	1,75	1,48

Tabla 2: Comparación de propiedades de los tipos de refuerzos por fibras.

### 2.1.3 TIPOS DE LAMINADOS

La combinación de la matriz con el refuerzo genera lo que se conoce como lámina. Los laminados resultan de los apilamientos de éstas en dirección perpendicular al plano de la lámina, generando una continuidad del material. Dependiendo del tipo de lámina, se generará un laminado con unas propiedades determinadas. Existen 3 tipos de láminas.

- **Láminas de cinta:** Todas las fibras se encuentran orientadas en una única dirección y presentan una isotropía transversal (mismas propiedades en direcciones perpendiculares a las fibras). El apilamiento de las láminas de cinta en una dirección genera el laminado unidireccional.

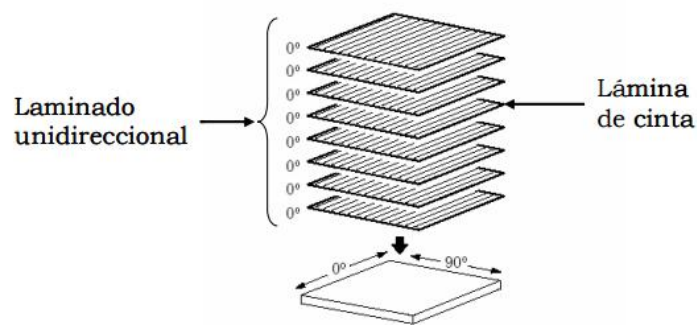


Figura 4: Laminado unidireccional [7]

Sin embargo, existen varias alternativas para generar distintos laminados según los apilamientos de las láminas de cinta. Los laminados 0/90 (Figura 5) se fabrican a partir del apilamiento de láminas en dos direcciones ortogonales, generando así un material con propiedades y comportamiento ortótropo.

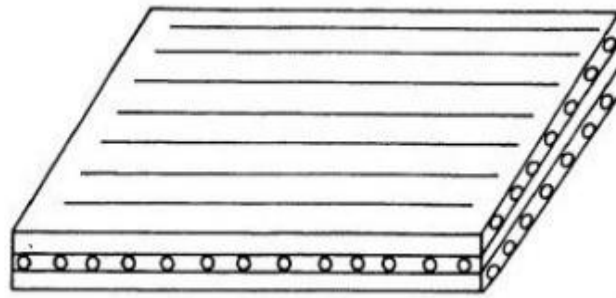


Figura 5: Laminado ortótropo [6].

También es posible obtener materiales cuasi-isótropos con una combinación de láminas de cinta. Esto se consigue con laminados que alternan láminas a 0, 90 y 45 grados de orientación.

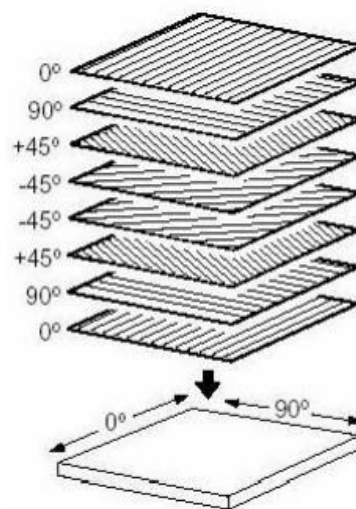


Figura 6: Laminado cuasi-isótropo [7].

Cómo último apunte, es preciso indicar que en la mayoría de casos se emplea un laminado simétrico sobre un plano imaginario a la mitad del grosor total del material. La Figura 6 es un ejemplo de esa simetría, aunque también se puede apreciar en la Figura 7.

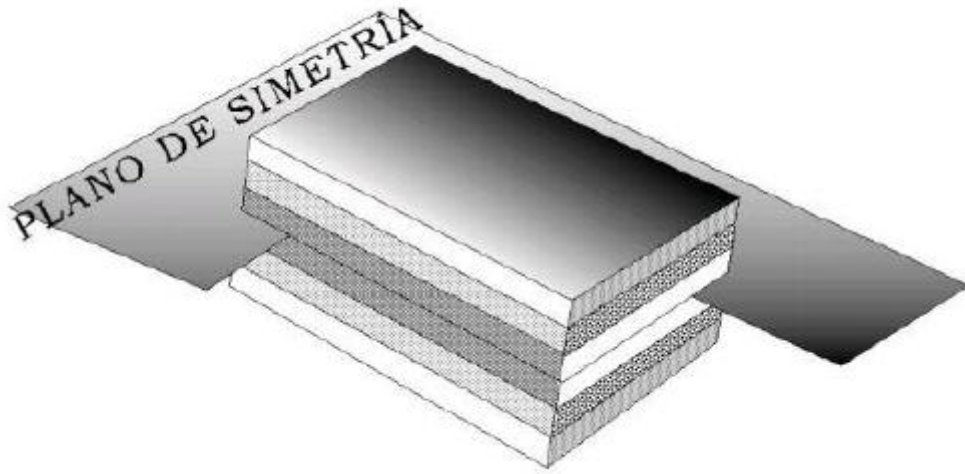


Figura 7: Laminado simétrico

- **Láminas de tejido:** Pueden presentar varias configuraciones, pero todas ellas con un factor común, y es que la orientación de las fibras se realiza en dos direcciones, que son perpendiculares entre sí y siguiendo una secuencia de enlazado. Generan una red de fibras longitudinales denominadas urdimbres, que se encuentran entrelazadas con fibras transversales que reciben el nombre de tramas. De acuerdo con la cantidad de fibras en una dirección o en otra se pueden generar distintas láminas de tejido. Lo más común es encontrarse un reparto equitativo de láminas en una dirección y en su ortogonal, de manera que el laminado generado es equilibrado y es conocido como tafetán. Su principal característica es la uniformidad en las propiedades en las direcciones ortogonales de las fibras.

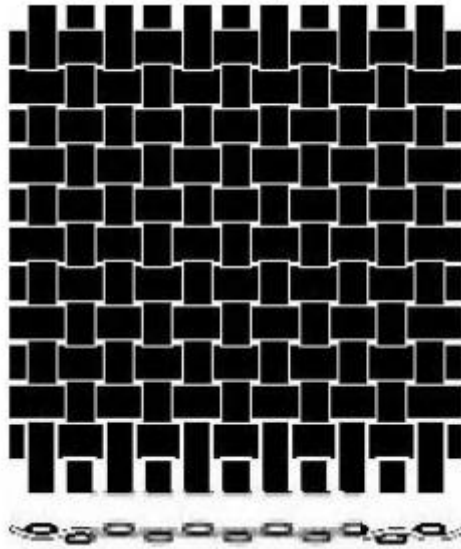


Figura 8: Lámina de tejido tafetán [6].

- **Láminas tipo MAT:** Compuesto por fibras distribuidas aleatoriamente, que genera un comportamiento isótropo del laminado. Este alineamiento en todas las direcciones de sus fibras provoca que el material pueda ser sometido a cualquier tipo de esfuerzos. Se utiliza en ensayos o en aplicaciones en las que el material es traccionado o comprimido en más de una zona y dirección.

## 2.2 APLICACIONES

Los materiales compuestos han supuesto una gran innovación en la industria. En la actualidad, muchos sectores han incorporado el uso de este tipo de materiales debido a sus buenas propiedades mecánicas. Su resistencia al ser sometidos a cargas y su baja densidad frente a materiales corrientes hace que su utilización sea un acierto, pues en muchas ocasiones supone hasta un 50% del peso total de la estructura. La citada reducción de peso supone un ahorro importante de combustible además de un mayor respeto medioambiental. En la Figura 9 se observa el porcentaje en peso de algunos de los prototipos de la empresa Airbus.

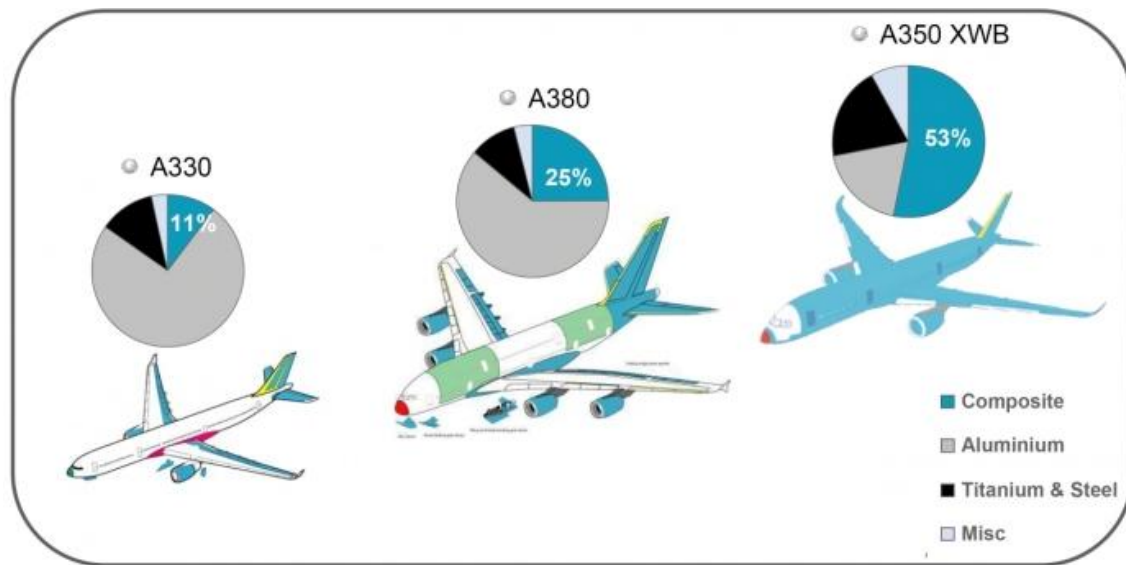


Figura 9: Porcentaje de materiales compuestos en industria aeronáutica.

Dentro de esta industria la aviación civil es el segmento con mayor consumo y demanda, pero los materiales compuestos están entrando con fuerza en el resto de sectores industriales. Para analizar sus inicios es necesario remontarse a los años 80, a pesar de que la influencia de este tipo de materiales era muy pequeña en la totalidad de la aeronave. En aviación militar, la introducción importante tuvo lugar en los años 70. También en helicópteros tienen gran influencia; como dato, es necesario apuntar que en helicópteros modernos aproximadamente el 85% del peso total del aparato corresponde a materiales compuestos. A continuación se muestra una imagen de la distribución de los materiales utilizados. La capacidad mundial actual de producción de fibra de carbono de grado aeroespacial se estima en unas 60000 Tm/año [8].



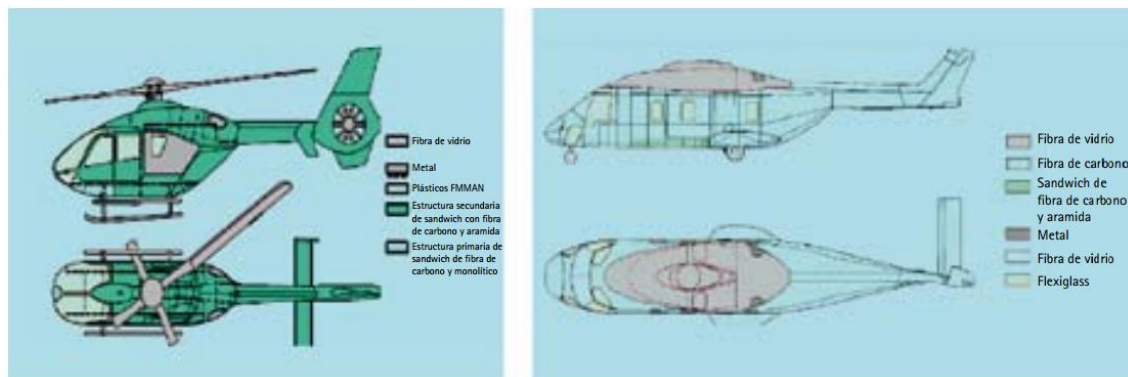


Figura 10: Estructuras y componentes en materiales compuestos para helicópteros.

En la industria de la automoción también es de gran importancia reducir al máximo el peso del vehículo; cuanto menor sea, más fácil es desplazarlo, menor esfuerzo se necesita y consiguiente menor es el consumo y las emisiones a la atmósfera. De forma general, un 10% en la reducción del peso permite un ahorro en consumo de combustible de un 6 a un 8%. Además, en el caso de vehículos eléctricos, una reducción del peso supone una mayor autonomía, pues se puede recorrer una mayor distancia sin necesidad de cargar las baterías.

Sin embargo, en la fabricación del automóvil se deben tener en cuenta otros factores de vital importancia, como la seguridad, la estética o la resistencia a agentes atmosféricos. Es por eso por lo que la fibra de carbono se va cada vez incorporando más en la fabricación de nuevos prototipos. En vehículos de competición, la fabricación de prototipos sin utilizar fibra de carbono se hace prácticamente impensable.

A pesar de ello, no es el único material compuesto empleado. Las aleaciones poliméricas y plásticos reforzados con fibra de vidrio en la fabricación de paneles exteriores de la carrocería permiten obtener piezas con una calidad óptima. Se trata de materiales capaces de soportar temperaturas de 1700 a 1900°C sin presentar deformaciones ni inestabilidad dimensional, así como tampoco variaciones superficiales. También permiten obtener piezas directamente del color deseado, evitando así pasar después a un proceso de pintado [9].

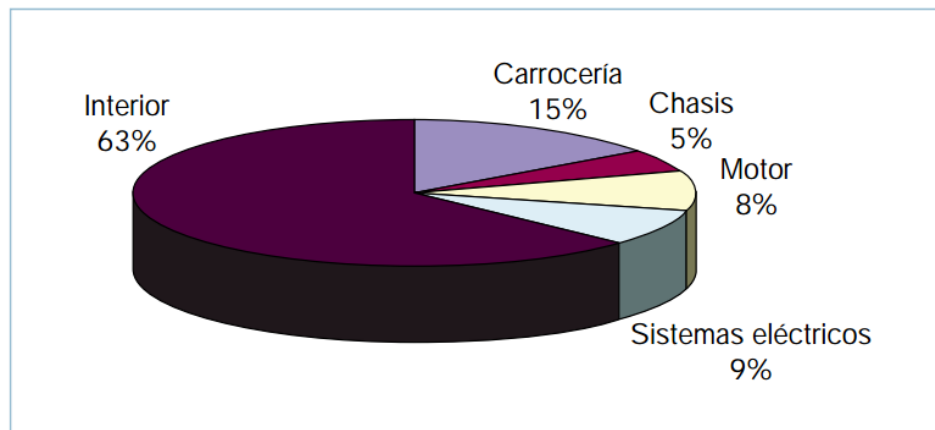


Figura 11: Contribución de materiales plásticos, reforzados o no, al diseño de diferentes componentes y sistemas de un automóvil [9].

En el mundo de la construcción también se van incorporando poco a poco los materiales compuestos. Es preciso diferenciar las estructuras según aparecen en ellas estos materiales; por un lado tenemos estructuras “all-composite”, superestructuras de puentes (vigas y tableros) hechos íntegramente de materiales compuestos. Pero también se tienen sistemas híbridos que combinan vigas de FRP (fibre reinforced polymers) y tableros de materiales tradicionales [10].

En la Figura 12 se muestran los tableros más comunes, que se pueden dividir en dos grupos: perfiles de pultrusión y paneles sándwich.

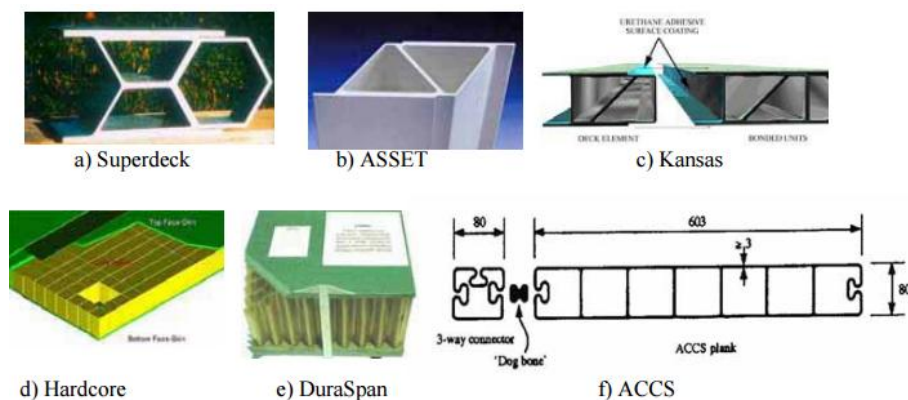


Figura 12: Tableros fabricados con FRP [10].

La primera pasarela “all-composite” en Europa se encuentra en Aberfeldy, Escocia, de 1992. En ésta, todos los componentes son de FRP (pilones, cables, vigas y tablero). Otro ejemplo es la de Pontresina, en Suiza, formada por dos vanos que combinan uniones adhesivas y atornilladas. Esta estructura se monta y desmonta todos los años.



Figura 13: Pasarelas de Aberfeldy y Pontresina.

El primer puente híbrido que ha incorporado una concepción adaptada al material se construyó en Estados Unidos en el año 2000. Se trata del King’s Stormwater Channel Bridge.



Figura 14: Primer puente híbrido construido en EEUU [10].

En la industria aeroespacial, la construcción de naves y lanzaderas utilizando materiales compuestos supone un verdadero reto. Con ello se busca la mencionada reducción de peso, pero también es necesario que soporten altas temperaturas. Un ejemplo es la lanzadera Ariane V (Figura 15), con tejidos, núcleos y prepegs resistentes al calor [7].



Figura 15: Lanzadera Ariane V.

## 2.3 ENSAYOS DE IMPACTO

A lo largo de su ciclo de vida, los materiales están sometidos a multitud de procesos de carga y descarga. El diseño de los objetos debe ser capaz de prever las reacciones ante las distintas sollicitaciones mecánicas a las que se van a someter. El objetivo de los ensayos de impacto es conocer cómo reacciona el material frente a la aplicación de una carga.

Los daños en impactos en las piezas en ocasiones son difíciles de detectar, pero pueden originar una reducción en las propiedades mecánicas. Las investigaciones son importantes para tener una capacidad preventiva del daño, y los ensayos de impacto ayudan a ello.

Existen varios tipos de estudios para evaluar los daños. Por un lado, los ensayos experimentales con aparatos y materiales específicos, entre los que se puede destacar el ensayo de impactos en la torre de caída libre (Figura 16). Este trabajo permite obtener

una idea muy real sobre el comportamiento del material, pero su principal inconveniente es que se trata de un ensayo destructivo, incapacitando la muestra para usos posteriores.



Figura 16: Torre de caída libre.

En el análisis de impactos en tejidos de materiales compuestos es común la diferenciación entre impactos a alta y baja velocidad. Los impactos a alta velocidad están normalmente relacionados con masas pequeñas de órdenes de magnitud de gramos. Por otro lado, los impactos a baja velocidad suelen ir asociados a masas más grandes, oscilando magnitudes de kilogramos [1]. Dependiendo de cuáles sean los parámetros de los materiales que se quieran estudiar, se lleva a cabo un ensayo u otro. Esto es debido a que los resultados centran su interés en propiedades bien distintas dependiendo del tipo de ensayo. Como bien se explica en la sección 1.2, a lo largo de este trabajo se va a estudiar cuál es la influencia de la masa en el ensayo del impacto.

### 2.3.1 IMPACTOS A BAJA VELOCIDAD

Los ensayos de impactos a baja velocidad están teóricamente siempre relacionados con masas relativamente altas. Ejemplos típicos son los que pueden ocurrir

en la industria aeronáutica, en un avión en el que se están llevando a cabo tareas de mantenimiento y se produce un impacto con alguna herramienta o algún equipo. En la industria automovilística, se utilizan estos ensayos para diagnosticar cómo se comportaría el material frente a una colisión con otro vehículo o con alguna piedra de tamaño considerable [1].

Existen diversas diferencias a la hora de tomar como referencia una velocidad límite a partir de la cual todos los impactos se consideran de alta velocidad. Algunos autores toman 100 m/s como el valor por debajo del cual todos los impactos son de baja velocidad [12]. En otros artículos se propone una ecuación que determine esa velocidad de transición que permite considerar una dominancia de las ondas de tensión generadas [13].

La propagación de las ondas de tensión generadas llega hasta los bordes de la estructura, de manera que la respuesta es global y depende fundamentalmente de la geometría y las condiciones de contorno.

Por lo general, en este tipo de impactos se producen daños en zonas no visibles (aunque muchas veces sí son apreciables) y generan delaminaciones o fallos interlaminares. Aunque la superficie no presente ningún daño a simple vista tras el choque, el material ha podido perder parte de sus propiedades mecánicas que a la larga puede tener efectos muy negativos en la vida útil del mismo.

Como se ha dicho anteriormente, las delaminaciones son el daño producido en este tipo de ensayos y se producen por una propagación de las fisuras a través de la matriz, lo que provoca que las láminas adyacentes se despeguen. Además, este despegue estará en mayor medida facilitado por una distinta orientación entre las láminas [14]. Según se observa en la Figura 17, el área delaminada tiene forma de elipse y depende fundamentalmente de la diferencia entre los módulos de elasticidad en las distintas orientaciones, el espesor de la lámina y la deflexión del laminado [15].

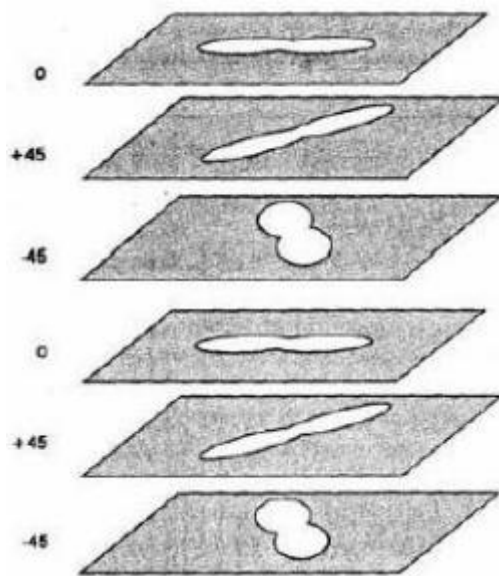


Figura 17: Orientación y forma de las delaminaciones [12].

Resumiendo, por tanto, se puede concluir que en los impactos a baja velocidad se observan 3 tipos de daños principalmente: La rotura de la matriz, que genera la concentración de tensiones que se propaga por toda la estructura, las delaminaciones y las roturas de la fibras, como consecuencia de una propagación de la fisura en dirección perpendicular a la orientación de la fibra.

### 2.3.2 IMPACTOS A ALTA VELOCIDAD

Se catalogan dentro de este tipo de impactos aquellos que suelen producirse para masas pequeñas con cierta velocidad inicial elevada. Estos ensayos aportan datos y conclusiones distintas a los de baja velocidad. Si con estos últimos es posible realizar un estudio de la evolución de las propiedades a lo largo de su vida útil sin tener daño visible en la superficie, los impactos de masas pequeñas producen generalmente perforaciones en la superficie críticas en la integridad de los elementos estructurales.

De esta forma es posible llegar a conclusiones sobre parámetros como el límite balístico, que es la velocidad por debajo de la cual el impacto no provoca la perforación del material. También la velocidad residual, que se define como la velocidad con la que



el elemento impactador atraviesa el material y sale de éste. Otro dato interesante es la energía de perforación, definida como la energía mínima necesaria para que se produzca la perforación en impactos de altas velocidades. En la Figura 18 se observa el fenómeno conocido como tapón de cortadura, provocado por la mencionada perforación a alta velocidad.

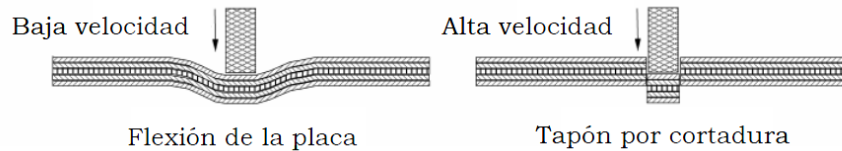


Figura 18: Efecto de la velocidad en la respuesta del laminado de fibra de carbono en resina polimérica [16].

A pesar del interés del análisis de impactos a alta velocidad, en este trabajo se va a incidir en las características de los impactos a baja velocidad al ser el objeto de estudio.

### 2.3.3 ENSAYOS EXPERIMENTALES

Debido a que este trabajo se centrará en el análisis de un impacto a baja velocidad, en esta sección se incidirá fundamentalmente en este tipo de ensayos. Para ello, es preciso comenzar diciendo que los primeros que aparecieron rondan los años 80. Es el caso del estudio de Caprino et al. [21], donde sus autores pudieron afirmar que el principal parámetro de estudio es la energía de impacto.

En los años posteriores, se comenzó a utilizar la torre de caída para analizar las zonas de daño en los materiales bajo unas condiciones de impacto controladas. Sobre esto se profundizará en el siguiente apartado, aunque es necesario mencionar los trabajos de Cantwell et al [17, 22, 23] para impactos a baja velocidad.

Los estudios posteriores centraron su atención en la fuerza residual después del impacto, aunque también resultaron destacables los trabajos de Pavier y Clarke [24] en

los que se evaluaban los daños tanto por delaminaciones como en la rotura de la matriz. Otro trabajo relevante permitió estudiar cómo influían las condiciones de contorno, espesor de la lámina y demás características en la fuerza de contacto generada [25].

Recientemente se han llevado a cabo análisis experimentales que tratan directamente el tema de interés de este proyecto. Se trata de los estudios de la influencia de la masa en los impactos a baja velocidad. J.A. Artero Guerrero, J. Pernas Sánchez et al [1] varían la masa del proyectil que impacta sobre la muestra para obtener distintas conclusiones en impactos equienergéticos.

Por otro lado pero siguiendo la misma tendencia aparece el trabajo de Zabala H., Aretxabaleta L. et al [28], donde también afrontan el mismo problema que en el trabajo mencionado anteriormente, obteniendo unas conclusiones que divergen de las planteadas hasta entonces.

A continuación se va a explicar algo más detalladamente la torre de caída, el método más común para este tipo de ensayos y por qué es un buen medio utilizado en estos estudios.

La torre de caída es uno de los instrumentos experimentales más utilizados en los estudios de impactos a baja velocidad. La razón es la facilidad que tiene para reproducir condiciones de impacto, que como ya se ha dicho, va a resultar clave para determinar fallos en los materiales durante sus procesos de fabricación o en uso. Permite detectar fácilmente una degradación de las propiedades mecánicas.

Junto con el péndulo de Charpy, también utilizado en impactos, es el elemento más utilizado. Permite realizar ensayos de flexión y tracción como el péndulo, pero además de flexión biaxial. En la torre de caída es posible dirigir el impacto desde diferentes alturas con pesos también variados. Se monta una estructura formada por el peso colocado en un marco unido a una célula de carga que se conecta al impactador o penetrador. Éste tiene forma cilíndrica y en su extremo le remata una semiesfera con el mismo diámetro. Existen algunos estudios en los que se trata la influencia de la geometría del percutor en el laminado [26], pero por lo general se considerará uno semiesférico como se ha apuntado y como se detallará en el modelo del ensayo de este trabajo.

El conjunto de peso es guiado por unas barras verticales que facilitan el descenso. Las muestras de ensayo se colocan sobre el útil en la parte inferior de la torre de caída. La adquisición de datos se lleva a cabo a través de un ordenador conectado a la célula de carga y proporciona un listado de velocidades, cargas y energías durante el ensayo. En la Figura 19 se observa el prototipo utilizado en estudios en la Universidad Carlos III, mientras que en la Figura 20 aparecen los útiles sobre los que se montan las probetas dependiendo del tipo de ensayo que se le practique.



Figura 19: Torre de caída de la Universidad Carlos III.



Figura 20: Útiles empleados en ensayos en torre de caída de la Universidad Carlos III [27].

En este trabajo se va a realizar una modelización de impactos partiendo de la idea de simular un ensayo en torre de caída. Como se explicará más adelante, es necesario aplicar varias condiciones de simulación con el fin de reproducir lo más exactamente posible los resultados que tendría dicho ensayo en la torre de caída.

### 2.3.4 SIMULACIONES NUMÉRICAS

Se han visto hasta ahora antecedentes sobre estudios y análisis experimentales, pero también es necesario aportar información para entender cuál ha sido el alcance hasta ahora de las simulaciones numéricas y su relación con dichos ensayos experimentales.

El principal punto de interés de las simulaciones es observar cuál es la exactitud con la que consiguen aproximarse a los resultados reales. Sobre esto, T. Børvik, O. S. Hopperstad et Al [18, 19] han demostrado que existe una buena relación entre las simulaciones numéricas y los resultados experimentales. Concretamente centraron su atención en la penetración de distintas placas de acero variando la forma del cabezal del proyectil.

Muy unido a estos estudios numéricos sobre penetraciones aparece el desarrollado por A. Castellanos, M. Martínez y M. Arias [20], donde se utiliza el software ANSYS Workbench con el módulo AUTODYN para llevar a cabo una

simulación numérica donde también se impacta una muestra de acero y se analizan parámetros como la velocidad residual.

La modelización de impactos es muy utilizada en la industria del automóvil, concretamente dentro del apartado relacionado con la seguridad. Nos encontramos en un momento en el que cada vez se le asigna mayor importancia en el diseño a la evaluación de la seguridad frente a impactos, habiéndose constituido este aspecto en una de las claves del éxito comercial de ciertos automóviles. Por tanto, se tiene que en este ámbito multidisciplinar es donde se está realizando un esfuerzo de investigación mayor, tanto a nivel experimental como de cálculo.

La principal conclusión que se obtiene de estos análisis numéricos es que el impacto como sollicitación dinámica exige un tratamiento específico, con un carácter no lineal a diferencia de otros casos en dinámica estructural. Por ello, es prácticamente de obligado cumplimiento el cálculo numérico con integración directa en el tiempo [33].

Además, dado que la simulación numérica es un método de cálculo relativamente accesible para todo el mundo y no requiere de un gasto económico excesivo, muchas veces es el tema escogido por mucha gente como trabajos de fin de estudios, tesis doctorales o artículos de investigación. Por todo ello aparecen gran cantidad de trabajos sobre simulaciones numéricas y probablemente todos ellos merecerían ser mencionados en esta sección. Los principales objetos de estudio son análisis numéricos sobre materiales compuestos [34], análisis de impactos balísticos [35] o análisis de impactos de vehículos como se mencionaba anteriormente [36].

Actualmente aparecen muchos precedentes en simulaciones numéricas. Muchos de ellos, sobre todo los relacionados con impactos balísticos, están enfocados dentro de los impactos a alta velocidad como se describía en secciones anteriores. Sin embargo, las modelizaciones de impactos a baja velocidad (objeto de estudio de este trabajo) también poseen interesantes estudios que han aportado gran cantidad de conclusiones.

En el caso de las simulaciones sobre materiales compuestos, generalmente se eligen los impactos a baja velocidad para evaluar sus propiedades. L. Arronche, V. La Saponara et al [37] aportan un ejemplo de análisis de dos muestras de material compuesto con distinta geometría para impactos a baja velocidad. También R.J. Barrios,

I. Iturrioz et al [38] utilizan los impactos a baja velocidad con el método de los elementos discretos para estudiar experimental y numéricamente qué sucede en este caso con una muestra en forma de disco de polímero.

En definitiva, puede observarse cómo las simulaciones numéricas se pueden aplicar a infinidad de casos. Se puede ver que las conclusiones obtenidas en cada uno de los estudios aportados son diversas. Esto es debido a que mediante la modelización de impactos se abarcan muchos campos de estudio y a lo largo de los últimos años ha permitido contrastar numerosos problemas que hasta entonces sólo habían sido demostrados experimentalmente.

### **3. MODELIZACIÓN DEL IMPACTO**

### 3.1 INTRODUCCIÓN A LA MODELIZACIÓN

Como bien se presentaba al inicio de este trabajo, existen diferentes motivos por los cuáles se llevan a cabo los análisis numéricos en la ingeniería. Muchas veces se tiene en mente realizar un proyecto cuyos costes se antojan elevados en los que es necesario obtener una simulación para predecir el resultado variando diferentes parámetros. El riesgo de ensayar productos ya desarrollados supone una pérdida económica por la posible destrucción de la muestra, lo que hace que una simulación numérica sea la solución previa construcción. Además, dada su rapidez permite realizar varias pruebas a la vez.

Como ya se ha introducido previamente, en este trabajo se va a proceder a la simulación numérica con el objetivo de analizar el comportamiento de una muestra de material en distintas condiciones para poder obtener resultados numéricos que sean capaces de sostener conclusiones sobre el comportamiento de los materiales. De esta manera, se ha modelizado un ensayo de impacto perpendicular a baja velocidad en torre de caída, variando los parámetros de la velocidad inicial y de la masa del proyectil con el fin de obtener distintas energías de impacto y poder así analizar la influencia de cada uno de estos parámetros en los resultados. Como se ha explicado en los capítulos anteriores, el objetivo de la modelización es analizar cómo influye la masa en el impacto, mediante el análisis de casos equienergéticos.

### 3.2 GEOMETRÍA

Para la modelización del impacto se ha seguido el procedimiento típico en un ensayo de impacto a baja velocidad en una torre de caída. En la Figura 19 se puede observar el prototipo utilizado en los ensayos experimentales, y que por tanto se trata de reproducir en la simulación.

Traduciéndolo al modelo numérico, el primer paso consiste en la modelización del impactador. Para ello, cabe destacar que la parte más importante es la que entra en contacto con la muestra. Como se ha explicado en capítulos anteriores, existen



diferentes tipos de geometrías del impactador en los ensayos. En la modelización de este trabajo se ha elegido la forma semiesférica, al igual que se llevó a cabo en otras simulaciones anteriormente [30], siendo éste el que más se ensaya experimentalmente. Además es necesario decir que el resto de las partes del percutor carecen de importancia geométrica, así como el fenómeno de propagación de ondas en el resto de la barra.

Para todo el modelo se asume una simetría tanto en el eje X como en el eje Y, lo que se traduce en que sólo se modeliza un cuarto de la estructura con el fin de conseguir un ahorro de coste computacional y una simplificación del caso. Por tanto, en lo que al percutor se refiere, se trabaja con un cuarto de la semiesfera, es decir, un octavo de una esfera con un radio de 10 mm. Además, todo el conjunto impactador está modelizado a partir de la semiesfera citada y el prisma de acero correspondiente, de altura 40 mm. En la Figura 21 se puede ver un esquema del percutor modelizado.

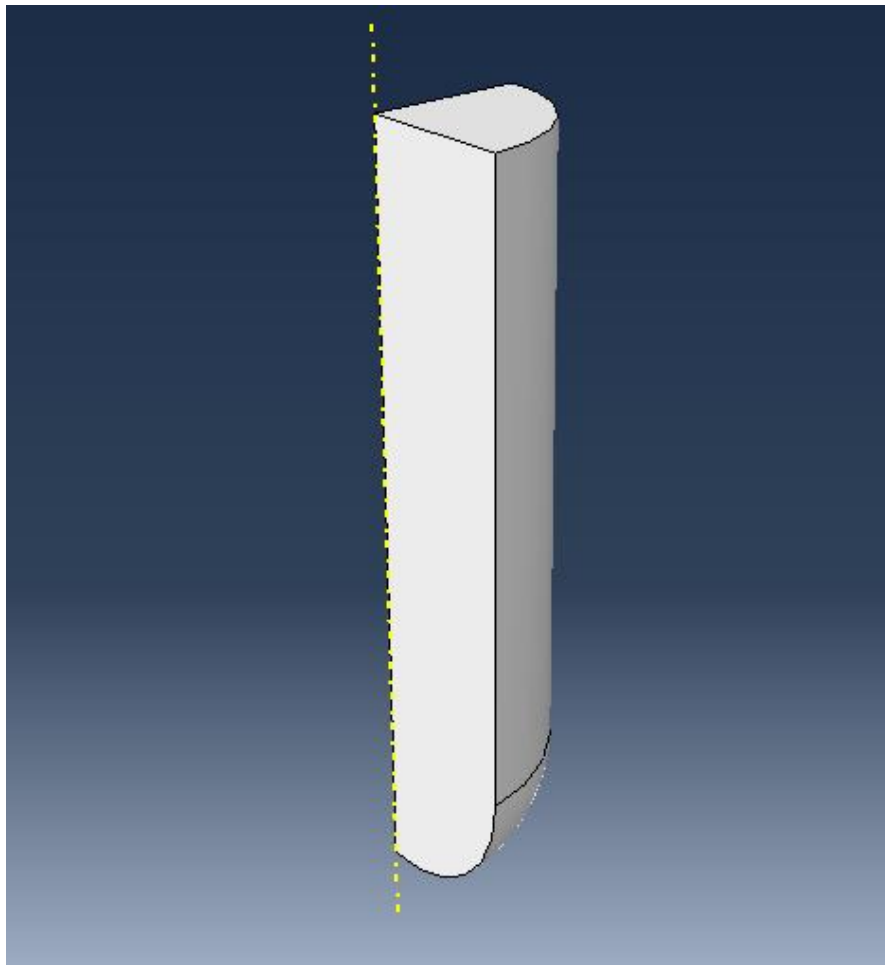


Figura 21: Modelo del proyectil impactador.

Para modelizar los tres casos de estudio, es necesario obtener tres impactadores distintos cuyas masas son de 15,8 kg, 7,8 kg y 3,8 kg. En el modelo numérico se consigue variando la densidad manteniendo constante el volumen. Como se ha dicho anteriormente, se desprecia el efecto producido por la propagación de ondas a lo largo del percutor y no se considera relevante. En la Tabla 3 se muestran los valores utilizados en cada caso.

Tabla 3: Datos volúmen, densidad y masa del impactador.

	Volumen ( $mm^3$ )	Densidad ( $kg/mm^3$ )	Masa (kg)
<b>Impactador 1</b>	14661,16	$2,6 \times 10^{-4}$	3,8

	Volumen ( $mm^3$ )	Densidad ( $kg/mm^3$ )	Masa (kg)
<b>Impactador 2</b>	14661,16	$5,32 \times 10^{-4}$	7,8
<b>Impactador 3</b>	14661,16	$1,07 \times 10^{-3}$	15,8

En cuanto a la geometría del material impactado, se modeliza un laminado de 80 x 80 mm. Utilizando el mismo método de simetría en ambos sentidos se tiene por tanto una lámina de 40 x 40 mm. En la Figura 22 se muestra una lámina con las dimensiones citadas.

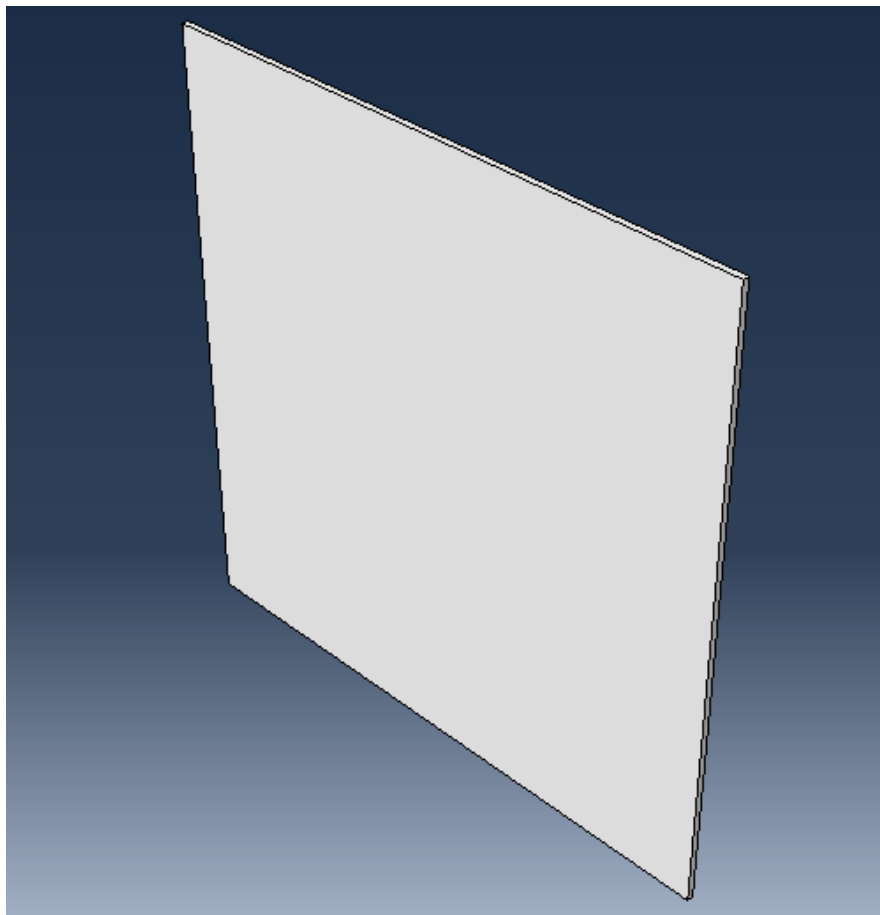


Figura 22: Modelo de una lámina.

En el caso estudiado, se ha elegido un tejido a impactar de 44 mm de espesor. Para que quede bien representado, es necesario modelizarlo utilizando 2 tipos de elementos distintos. Por un lado, es necesario definir la geometría y las propiedades de

la lámina propiamente dicha. La muestra estará compuesta por un apilamiento de un número determinado de láminas, que en función de los espesores necesitará un número mayor o menor de láminas simulando la composición de una muestra real de material compuesto.

Por otro lado, se utilizará otra parte con propiedades completamente distintas a las definidas para cada una de las láminas. Se trata del conocido como elemento cohesivo. Tal y como se ha expuesto en el capítulo 2, es común que aparezca la delaminación como un fallo típico interlaminar en los impactos sobre material compuesto. La necesidad de recrear este tipo de fallos en la simulación justifica el uso del elemento cohesivo entre cada una de las láminas.

Por tanto, para completar la modelización del laminado es necesario atribuir los espesores deseados con el fin de llegar a obtener los 44 mm de material que se pretenden ensayar. Así se asigna a cada una de las láminas un espesor de 0,435 mm y a cada cohesivo (que es representado con un espesor mucho más pequeño que la lámina) 0,005 mm.

De esta forma se utilizan 10 láminas apiladas entre cada una de las cuales se coloca el cohesivo reproduciendo el mencionado fallo interlaminar. Las 10 láminas y los 9 elementos cohesivos generan una muestra de 44 mm de espesor.

En la Figura 23 se observa el resultado detallado del conjunto modelizado.

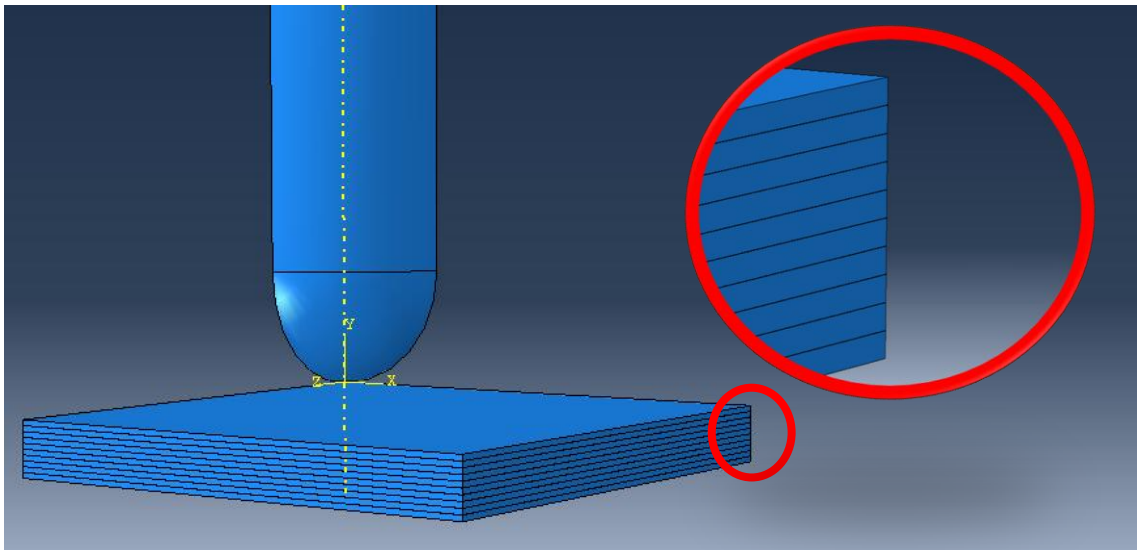


Figura 23: Imagen y detalle del modelo completo.

### 3.3 MATERIALES

En cuanto a los materiales, es preciso hacer distinción entre cada una de las partes del modelo y definir de forma precisa cada uno de los materiales, puesto que ayuda a determinar con mayor precisión el comportamiento de cada uno tras el impacto.

En primer lugar se tiene el impactador, cuyas dimensiones y densidades se han definido anteriormente. En la Tabla 4 se muestran otras propiedades para el impactador, con un comportamiento elástico lineal.

	Módulo Young (Pa)	Coeficiente Poisson	Tipo elasticidad
Acero	$210 \times 10^9$	0,3	Isotrópica

Tabla 4: Propiedades acero impactador.

Uno de los aspectos más importantes en la simulación numérica de impactos es la capacidad para reproducir la forma en la que se daña el material tras él. Para cada simulación numérica vista en la sección 2.3.4 los autores asumen distintos modelos

donde se tienen en cuenta o se desprecian distintas variables. En el caso de este trabajo se utiliza un modelo en el que se trata de reproducir tanto el fallo interlaminar como el fallo intralaminar.

Para conseguir el efecto producido en las delaminaciones o fallos interlaminares se ha explicado anteriormente que se hace uso del elemento cohesivo con unas propiedades distintas a la lámina en lo que a rigidez y resistencia se refiere. Por otro lado en este modelo también se tiene en cuenta el fallo intralaminar, y para reproducirlo correctamente se recurre a la subrutina ABQ\_PLY\_FABRIC [31]. A través de ella el fabricante proporciona al usuario la capacidad de definir cada propiedad en el modelo.

Además, es necesario indicar que la densidad tomada para cada una de las láminas es de  $\rho = 1,52 \times 10^{-6} \text{ kg/mm}^3$ .

Esta subrutina permite determinar el comportamiento constitutivo del tejido de material compuesto empleado, teniendo en cuenta la ortogonalidad de sus fibras y expresando las propiedades de tensión – deformación bajo la siguiente expresión:

$$\begin{pmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{12}^{el} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{(1-d_1)E_1} & \frac{-\nu_{12}}{E_1} & 0 \\ \frac{-\nu_{21}}{E_2} & \frac{1}{(1-d_2)E_2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{(1-d_{12})E_2 \cdot G_{12}} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{12} \end{pmatrix}$$

Donde  $d_1$  y  $d_2$  representan las variables de daño en las dos direcciones de las fibras, mientras que  $d_{12}$  aparece representando el daño por cizalla. Existe una diferenciación entre el fallo de fibra a tracción y a compresión, así que dependiendo del estado de tensiones en cada dirección se activará una variable u otra.

$$d_1 = d_{1+} \frac{\langle \sigma_{11} \rangle}{|\sigma_{11}|} + d_{1-} \frac{\langle -\sigma_{11} \rangle}{|\sigma_{11}|}$$

$$d_2 = d_{2+} \frac{\langle \sigma_{22} \rangle}{|\sigma_{22}|} + d_{2-} \frac{\langle -\sigma_{22} \rangle}{|\sigma_{22}|}$$

Para poder distinguir entre tensiones en tracción o en compresión, se utiliza la función:

$$tr(\varepsilon) = \varepsilon_{11} + \varepsilon_{22}$$

Para la cual, cuando tome valores inferiores a 0, los valores de las constantes elásticas  $E_1$ ,  $E_2$  y  $\nu_{12}$  serán de compresión, y para los positivos serán de tracción.

Se tiene por tanto que la respuesta del laminado en cada una de las direcciones se debe principalmente al daño de las fibras en esas direcciones, siendo éste función de la tensión. Se puede tomar como:

$$d_{1+} = d_{1+}(\widetilde{\sigma}_{1+})$$

$$d_{1-} = d_{1-}(\widetilde{\sigma}_{1-})$$

$$d_{2+} = d_{2+}(\widetilde{\sigma}_{2+})$$

$$d_{2-} = d_{2-}(\widetilde{\sigma}_{2-})$$

Donde las tensiones efectivas se definen como:

$$\widetilde{\sigma}_{1+} = \frac{\langle \sigma_{11} \rangle}{(1-d_{1+})}$$

$$\widetilde{\sigma}_{1-} = \frac{\langle -\sigma_{11} \rangle}{(1-d_{1-})}$$

$$\widetilde{\sigma}_{2+} = \frac{\langle \sigma_{22} \rangle}{(1-d_{2+})}$$

$$\widetilde{\sigma}_{2-} = \frac{\langle -\sigma_{22} \rangle}{(1-d_{2-})}$$

Para simplificar las expresiones anteriormente citadas, se define el parámetro  $\alpha$  como:  $\alpha = 1 (+/-)$ ,  $2 (+/-)$ , dependiendo del signo de la tensión. Así, las ecuaciones ya mostradas se expresarán:

$$d_{\alpha} = d_{\alpha}(\widetilde{\sigma}_{\alpha})$$

Para cualquier instante se define el dominio elástico en términos de la activación del daño,  $F_\alpha$ , como:

$$F_\alpha = \phi_\alpha - r_\alpha \leq 0$$

Para la cual  $\phi_\alpha$  representa un criterio de fallo de la fibra, definido como:

$$\phi_\alpha = \frac{\widetilde{\sigma}_\alpha}{X_\alpha}$$

Donde  $X_\alpha$  es la resistencia a compresión y a tracción para cargas uniaxiales a lo largo de las fibras. Por su parte,  $r_\alpha$  se define como el umbral del daño, que toma valor inicial 1. Es función del tiempo, y a partir de la activación del daño, es decir, cuando  $\phi_\alpha = 1$  y por tanto la tensión efectiva toma el valor de la resistencia de las fibras comienza a aumentar el daño siguiendo la expresión:

$$r_\alpha(t) = \max_{t \leq \tau} \phi_\alpha(\tau)$$

Esta expresión asegura por tanto que los umbrales de daño no son cantidades decrecientes ( $\dot{r}_\alpha(t) \geq 0$ ). Estos umbrales obedecen a las condiciones complementarias de Kuhn-Tucker:

$$F_\alpha \leq 0$$

$$\dot{r}_\alpha \geq 0$$

$$F_\alpha \dot{r}_\alpha = 0$$

Y la condición de consistencia:

$$\dot{F}_\alpha \dot{r}_\alpha = 0$$

Cuando aparece el daño es necesario explicar cómo evoluciona. Dicha evolución es función de los umbrales del daño y de la energía de fractura por unidad de área en carga uniaxial de tracción o de compresión ( $G_f^a$ ). Como es evidente, la ley de evolución



del daño asegura un aumento de éste con el tiempo y se expresa de forma exponencial según:

$$d_{\alpha} = 1 - \frac{1}{r_{\alpha}} \exp \left( (-A_{\alpha}(r_{\alpha} - 1)) \right) \quad d_{\alpha} \geq 0$$

Donde,

$$A_{\alpha} = \frac{2g_0^{\alpha}L_c}{G_f^{\alpha} - g_0^{\alpha}L_c}$$

Para la cual se tiene que  $L_c$  es la longitud característica y  $g_0^{\alpha}$  es la densidad de energía elástica en el punto en el que se inicia el daño (es decir, por unidad de volumen).

$$g_0^{\alpha} = \frac{x_{\alpha}^2}{2E_{\alpha}}$$

En una carga uniaxial de tracción, la energía disipada por unidad de área es igual a la energía de fractura  $G_f^{1+}$ . Esto siempre es válido mientras:

$$G_f^{\alpha} - g_0^{\alpha} \cdot L_c > 0 \leftrightarrow L_c < L_{max} = \frac{G_f^{\alpha}}{g_0^{\alpha}}$$

Nótese que dicha expresión pretende garantizar con precisión la energía de fractura disipada, por lo que impone una restricción de la longitud característica máxima que se puede emplear.

En cuanto a la respuesta a cizallamiento es necesario decir que está dominada por el comportamiento no lineal de la matriz, y esto incluye tanto la plasticidad como la rigidez de degradación debida a la propagación de fisuras en la matriz. En términos de deformación elástica, la tensión elástica se expresa como:

$$\widetilde{\sigma}_{12} = \frac{\sigma_{12}}{(1-d_{12})} = 2G_{12} \varepsilon_{12}^{el} = 2G_{12} (\varepsilon_{12} - \varepsilon_{12}^{pl})$$

Sobre la plasticidad se definen dos funciones, la función de rendimiento y la regla de flujo. La primera tiene la forma:

$$F = \widetilde{\sigma}_{12} - \widetilde{\sigma}_0 (\bar{\varepsilon}^{pl}) \leq 0$$

Siendo la función de endurecimiento:

$$\widetilde{\sigma}_0 (\bar{\varepsilon}^{pl}) = \widetilde{\sigma}_{y0} + C(\bar{\varepsilon}^{pl})^p$$

Y la regla de flujo, suponiendo flujo asociado:

$$\dot{\varepsilon}_{12}^{pl} = \bar{\varepsilon}^{pl} \frac{\partial F}{\partial \widetilde{\sigma}_{12}} = \bar{\varepsilon}^{pl} \text{sign} (\widetilde{\sigma}_{12})$$

Donde la evolución del trabajo plástico viene dado por la expresión:

$$\dot{U}^{pl} = \sigma_{12} \dot{\varepsilon}_{12}^{pl} = (1 - d_{12}) \widetilde{\sigma}_{12} \dot{\varepsilon}_{12}^{pl} = (1 - d_{12}) \widetilde{\sigma}_0 \bar{\varepsilon}^{pl}$$

Se define la iniciación al daño ( $F_{12}$ ) en el dominio elástico como:

$$F_{12} = \phi_{12} - r_{12} \leq 0$$

Donde  $\phi_{12}$  es la función que indica la iniciación de los daños de cortadura en la matriz:

$$\phi_{12} = \frac{\widetilde{\sigma}_{12}}{S}$$

Siendo  $\widetilde{\sigma}_{12} = \sigma_{12}(1 - d_{12})$  la tensión de corte efectiva y S la resistencia de cizallamiento de la matriz.

Como ya se ha indicado, la evolución del daño ha de ser explicada a partir del valor inicial igual a 1, y comienza a partir de la aparición del daño ( $\phi_{12} = 1$ ):

$$r_{12}(t) = \max_{t \leq \tau} \phi_{12}(\tau)$$

Se tiene por tanto que en base a la relación tensión-deformación explicada anteriormente, los daños por cizallamiento aumentan con el logaritmo de la función umbral ( $r_{12}$ ), alcanzando su máximo en  $d_{12}^{max}$ .

$$d_{12} = \min (\alpha_{12} \ln(r_{12}), d_{12}^{max})$$

Donde  $d_{12}^{max} \leq 1$  y  $\alpha_{12} \geq 0$  son propiedades del material.

En relación a la eliminación de los elementos, se tienen dos casos:

- El elemento se elimina en el momento en el que el daño a compresión o a tracción alcanza un valor máximo ( $d_1 = d_{max}$  ó  $d_2 = d_{max}$ ) o también cuando es el valor de la deformación plástica en cizallamiento lo que alcanza un valor máximo especificado ( $\bar{\epsilon}^{pl} = \bar{\epsilon}_{max}^{pl}$ ). Dicha opción es activada cuando IDelFlag=1.
- El elemento se elimina si las variables de daño a lo largo de ambos sentidos de orientación de las fibras alcanzan un valor máximo ( $d_1 = d_2 = d_{max}$ ) o cuando la deformación plástica debida al cizallamiento alcanza un valor máximo. Esta opción se activa cuando IDelFlag=2.

Estas dos opciones son combinables bajo un criterio de eliminación de los elementos basado en los valores máximos ( $\hat{\epsilon}_{max} > 0$ ) y mínimos ( $\hat{\epsilon}_{min} < 0$ ) de deformaciones principales logarítmicas soportables por el material antes de eliminarlo.

Una vez explicados los valores de las variables que participan en la subrutina mencionada, es necesario definir las propiedades del material. Esto se lleva a cabo introduciendo hasta 8 propiedades en cada una de las 5 líneas habilitadas (no siendo obligatorio usar todas las posiciones), como se muestra en la Figura 24.

```
*MATERIAL, NAME= ABQ_PLY_FABRIC
*DENSITY
  ρ
*USER MATERIAL, CONSTANTS=40
** Line 1:
  E1+, E2+, ν12+, G12, E1-, E2-, ν12-
** Line 2:
  X1+, X1-, X2+, X2-, S
** Line 3:
  Gf1+, Gf1-, Gf2+, Gf2-, α12, d12max
** Line 4:
  σ̃y0, C, p
** Line 5:
  lDelFlag, dmax, ε̄maxpl, ε̂max, ε̂min
*DEPVAR, DELETE=16
16
```

Figura 24: Constantes del material compuesto elegido.

En las siguientes tablas (Tabla 5, Tabla 6, Tabla 7, Tabla 8 y Tabla 9) se explican y se muestran cada uno de los parámetros utilizados para definir el material.

Posición	Símbolo	Descripción	Valor
1	$E_{1+}$	Módulo de Young en la dirección 1 de las fibras cuando $\text{tr}(\epsilon) \geq 0$	68 GPa
2	$E_{2+}$	Módulo de Young en la dirección 2 de las fibras cuando $\text{tr}(\epsilon) \geq 0$	68 GPa
3	$\nu_{12+}$	Coeficiente de Poisson cuando $\text{tr}(\epsilon) \geq 0$	0,22
4	$G_{12}$	Módulo de cortadura	5 GPa
5	$E_{1-}$	Módulo de Young en la dirección 1 de las fibras cuando $\text{tr}(\epsilon) \leq 0$	68 GPa
6	$E_{2-}$	Módulo de Young en la dirección 2 de las fibras cuando $\text{tr}(\epsilon) \leq 0$	68 GPa
7	$\nu_{12-}$	Coeficiente de Poisson cuando $\text{tr}(\epsilon) \leq 0$	0,22
8	-	-	-

Tabla 5: Propiedades del material compuesto en la línea 1.

Posición	Símbolo	Descripción	Valor
1	$X_{1+}$	Resistencia a tracción en la dirección 1 de las fibras	828 MPa
2	$X_{1-}$	Resistencia a compresión en la dirección 1 de las fibras	883 MPa
3	$X_{2+}$	Resistencia a tracción en la dirección 2 de las fibras	793 MPa
4	$X_{2-}$	Resistencia a compresión en la dirección 2 de las fibras	880 MPa
5	$S$	Resistencia a cortadura	84 MPa
6-8	-	-	-

Tabla 6: Propiedades del material compuesto en la línea 2.

Posición	Símbolo	Descripción	Valor
1	$G_f^{1+}$	Energía por unidad de área de fractura a tracción a lo largo de la dirección 1 de las fibras	$39,4 \frac{kJ}{m^2}$
2	$G_f^{1-}$	Energía por unidad de área de fractura a compresión a lo largo de la dirección 1 de las fibras	$51,8 \frac{kJ}{m^2}$
3	$G_f^{2+}$	Energía por unidad de área de fractura a tracción a lo largo de la dirección 2 de las fibras	$39,4 \frac{kJ}{m^2}$
4	$G_f^{2-}$	Energía por unidad de área de fractura a compresión a lo largo de la dirección 2 de las fibras	$51,8 \frac{kJ}{m^2}$
5	$\alpha_{12}$	Parámetro de la ecuación de daños a cortadura	0,9
6	$d_{12}^{max}$	Daño máximo a cortadura	0,99
7-8	-	-	-

Tabla 7: Propiedades del material compuesto en la línea 3.

Posición	Símbolo	Descripción	Valor
1	$\widetilde{\sigma}_{y0}$	Tensión efectiva de cortadura inicial	199 MPa
2	C	Coeficiente en la ecuación de endurecimiento	0,001
3	p	Término de potencia en la ecuación de endurecimiento	1
4-8	-	-	-

Tabla 8: Propiedades del material compuesto en la línea 4.

Posición	Símbolo	Descripción	Valor
1	IDelFlag	Parámetro eliminación de elementos	1
2	$d_{max}$	Máximo valor de la variable daño	0,9999
3	$\bar{\varepsilon}_{max}^{pl}$	Máximo valor deformación plástica equivalente en eliminación de elementos	0
4	$\hat{\varepsilon}_{max}$	Máxima deformación principal positiva en eliminación de elementos	0
5	$\hat{\varepsilon}_{min}$	Máxima deformación principal negativa en eliminación de elementos	0
6-8	-	-	-

Tabla 9: Propiedades del material compuesto en la línea 5.

Para completar la subrutina se debe también introducir el número de variables de las que depende la solución, para lo cual se ha establecido el valor de 60 en la opción DEPVAR. Para el parámetro DELETE se ha tomado 16 como el número de variables que controlan la eliminación.

Una vez que queda definida la subrutina de definición de propiedades del material compuesto de la lámina para el fallo intralaminar, es necesario continuar con el cohesivo y el fallo interlaminar. Resultan de vital importancia para reproducir y explicar las delaminaciones, como se ha explicado anteriormente.

El criterio de daño del cohesivo necesita, como cualquier otro, una ley de evolución del daño a partir de un criterio de iniciación. En primer lugar es necesario definir una relación constitutiva como propiedad de la interfaz., que se lleva a cabo a partir de la ley de tracción separación que relaciona la tensión transmitida por la fisura con la separación. En la Figura 25 se muestra la evolución de dicha ley de tracción separación.

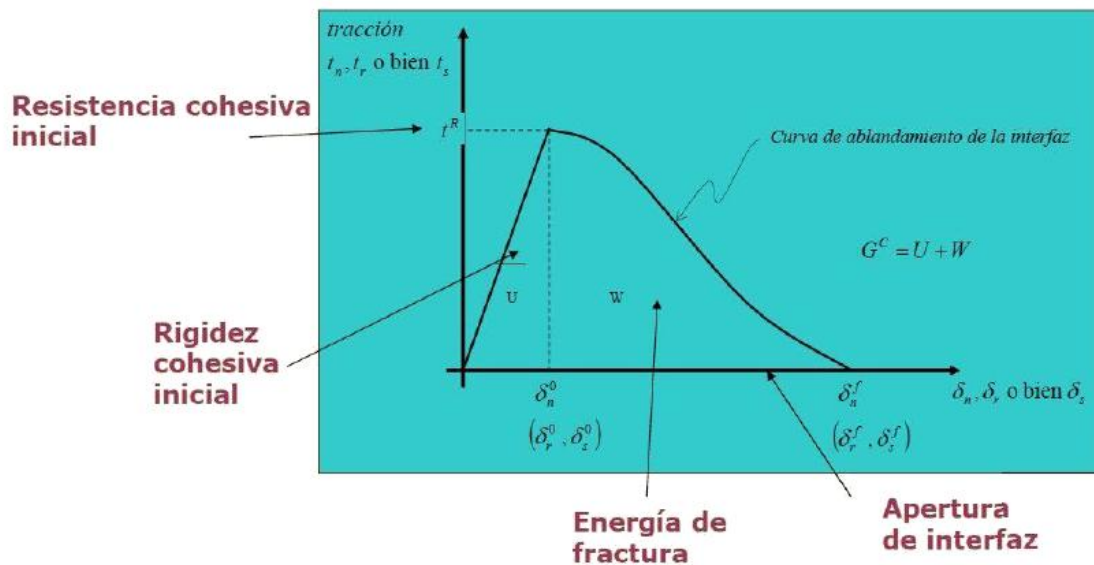


Figura 25: Curva de tracción separación de elementos cohesivos [30]

Como se puede observar, existe una fase inicial lineal definida por la relación tensión – deformación para dar después paso a una fase de ablandamiento que finaliza una vez que se ha perdido la capacidad para transmitir la tensión.

En la Figura 25 aparece la rigidez cohesiva inicial, siendo esta propiedad la que origina que el cohesivo se en mayor o menor medida antes del proceso de daño. Una alta rigidez puede originar problemas en la convergencia del problema. Cuanto mayor es, más tarda en aparecer la apertura de la interfaz.

También se observa el concepto de resistencia cohesiva inicial, que es la tensión máxima que la interfaz es capaz de transmitir para esfuerzos de tracción pura o cortadura pura. Coincide con el valor de tensión transmitida por el cohesivo cuando comienza a aparecer el daño. La apertura de la interfaz está relacionada con la forma de la curva de ablandamiento, que queda definida por la relación entre el daño escalar y la apertura. Es un parámetro que debe ser definido en el cohesivo.

Una vez que se han explicado los parámetros se detalla la expresión de la relación constitutiva, para la cual toma la relación entre tensión-deformación como:

$$\begin{Bmatrix} t_n \\ t_s \\ t_t \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{nn} & K_{ns} & K_{nt} \\ K_{ns} & K_{ss} & K_{st} \\ K_{nt} & K_{st} & K_{tt} \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \varepsilon_n \\ \varepsilon_s \\ \varepsilon_t \end{Bmatrix}$$

Donde las deformaciones ingenieriles ( $\varepsilon$ ) se expresan en función de la apertura de la interfaz ( $\delta$ ) y el espesor constitutivo inicial ( $L_0$ ).

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_n \\ \varepsilon_s \\ \varepsilon_t \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \delta_n/L_0 \\ \delta_s/L_0 \\ \delta_t/L_0 \end{Bmatrix}$$

Por simplicidad, se puede asumir que  $K_{ns}$ ,  $K_{ts}$  y  $K_{nt}$  toman valor 0, lo que significa que el desplazamiento normal no produce tensión de cortadura ni al revés.

En cuanto al daño en la matriz cohesiva es necesario establecer el criterio de iniciación del daño, a través de un criterio en tensiones o deformaciones. En dicha inicialización del daño, se establecen los valores de tensión y deformación máxima alcanzables por el cohesivo como  $t_n^0$ ,  $t_s^0$ ,  $t_t^0$  y  $\varepsilon_n^0$ ,  $\varepsilon_s^0$ ,  $\varepsilon_t^0$ . A partir de estos valores se pueden plantear dos criterios distintos basados en los valores máximos o valores cuadráticos máximos, que se exponen a continuación.

Para el criterio de valores máximos, se tiene relacionado con la tensión máxima:

$$\max \left\{ \frac{\langle t_n \rangle}{t_n^0}, \frac{t_s}{t_s^0}, \frac{t_t}{t_t^0} \right\} = 1$$

Y con la deformación máxima:

$$\max \left\{ \frac{\langle \varepsilon_n \rangle}{\varepsilon_n^0}, \frac{\varepsilon_s}{\varepsilon_s^0}, \frac{\varepsilon_t}{\varepsilon_t^0} \right\} = 1$$

En cuanto al criterio de valores cuadráticos máximos sobre tensiones:

$$\left( \frac{\langle t_n \rangle}{t_n^0} \right)^2 + \left( \frac{t_s}{t_s^0} \right)^2 + \left( \frac{t_t}{t_t^0} \right)^2 = 1$$

Y relacionado con las deformaciones:



$$\left(\frac{\langle \varepsilon_n \rangle}{\varepsilon_n^0}\right)^2 + \left(\frac{\varepsilon_s}{\varepsilon_s^0}\right)^2 + \left(\frac{\varepsilon_t}{\varepsilon_t^0}\right)^2 = 1$$

Una vez que se ha definido el criterio de iniciación del daño, se ha de explicar cómo se produce su evolución. A partir de que ha tenido lugar la condición de iniciación, si se siguen aumentando los desplazamientos, la interfaz comenzará a dañarse y dejará de transmitir tensiones.

$$\delta_n = \sqrt{\langle \delta_n \rangle^2 + \delta_s^2 + \delta_t^2}$$

Donde

$$\langle \delta_n \rangle = \delta_n \text{ si } \delta_n \geq 0$$

$$\langle \delta_n \rangle = 0 \text{ si } \delta_n \leq 0$$

Con esto, se obtiene una evolución de tensiones en la ley de separación de la siguiente manera:

$$t_n = (1 - D) \cdot \bar{t}_n \text{ si } \bar{t}_n > 0$$

$$t_n = \bar{t}_n \text{ si } \bar{t}_n < 0$$

$$t_s = (1 - D) \cdot \bar{t}_s$$

$$t_t = (1 - D) \cdot \bar{t}_t$$

Donde D es un parámetro de daño cuyo valor varía entre 0 y 1.

Por otro lado, se define la energía de fractura ( $G_C$ ) como la suma de la energía potencial elástica del elemento cohesivo y el trabajo de ablandamiento que se debe realizar sobre el elemento para su degradación completa. Para representar el trabajo normal y de cizallamiento se introducen las variables  $G_n$ ,  $G_t$  y  $G_s$ . Así, se tiene que:

$$G_T = G_n + G_t + G_s$$

Y la rotura del elemento cohesivo se producirá totalmente cuando el valor de  $G_T$  alcance el valor de la energía de fractura  $G_C$  [30].

En la Tabla 10 se muestran las propiedades introducidas para el elemento cohesivo.

Símbolo	Descripción	Valor
$\rho$	Densidad	$1,52 \times 10^{-6} \text{ kg/mm}^3$
$t_n$	Resistencia en dirección normal	33 MPa
$t_s$	Resistencia en dirección transversal 1	135 MPa
$t_t$	Resistencia en dirección transversal 2	135 MPa
$K_{nn}$	Coeficiente de rigidez en dirección normal	20 GPa/mm
$K_{ss}$	Coeficiente de rigidez en dirección transversal 1	15 GPa/mm
$K_{tt}$	Coeficiente de rigidez en dirección transversal 2	15 GPa/mm

Tabla 10: Propiedades del elemento cohesivo.

### 3.4 INTERACCIONES

El siguiente paso es definir las interacciones entre cada una de las partes para el correcto impacto. En primer lugar se define la propiedad que permite asegurar el contacto entre las superficies deseadas. Para este caso, se toma como primera interacción la que tiene lugar entre el impactador y la lámina superior, siendo un contacto normal entre ambas partes.

A continuación es necesario establecer la relación entre los cohesivos y las láminas. Como se ha explicado en la sección 3.2, para este problema se tienen 10 láminas y 9 elementos cohesivos entre ellas. Se establecen por tanto 2 interacciones por cohesivo, una para cada lámina con la que está en contacto. El contacto escogido es tipo “Tie”, puesto que refleja la unión entre ambas superficies. En la Figura 26 y en la Figura 27 se muestra un ejemplo concreto de esta interacción, concretamente la que tiene lugar entre la parte superior del primer cohesivo con la primera lámina.

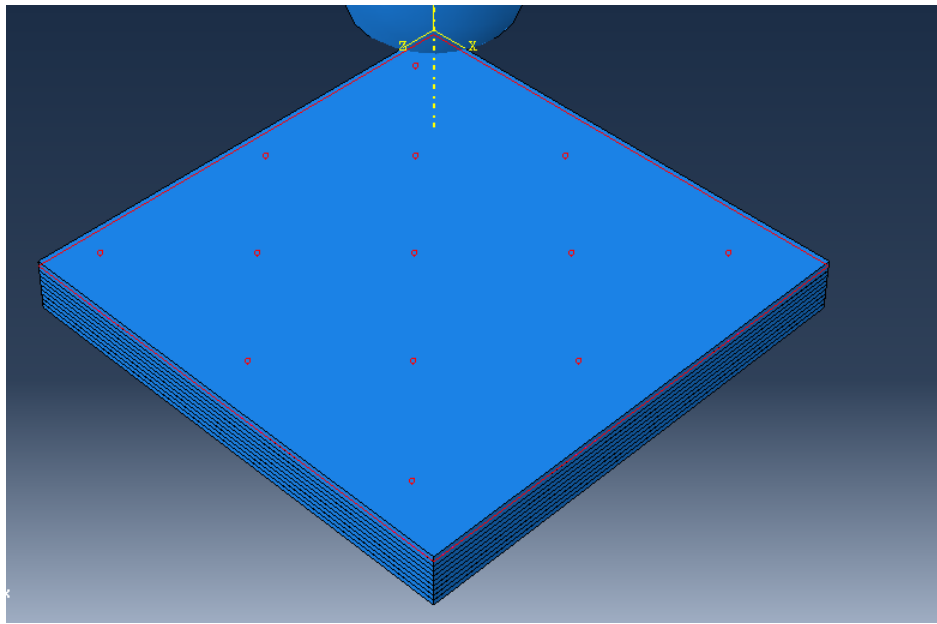


Figura 26: Interacción entre cohesivo y lámina.

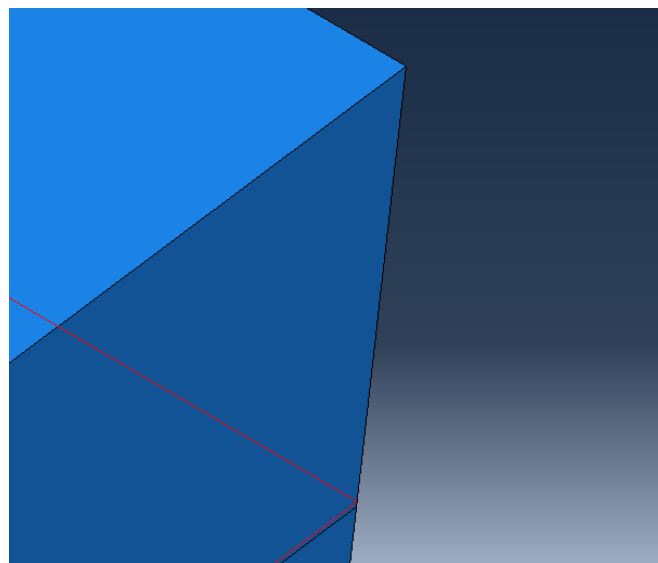


Figura 27: Detalle interacción cohesivo y lámina.

### 3.5 CONDICIONES DE CONTORNO

Mediante las condiciones de contorno atribuidas al problema se trata de asemejarse al máximo a un caso real de impacto. Para ello se ha recurrido a aplicar las mismas que se emplean en un ensayo típico. En primer lugar es necesario modelizar el

movimiento del impactador como traslacional únicamente en una dirección. Así en la Figura 28 se observa cómo se ha definido su movimiento sólo en sentido vertical simulando lo que sucede en la torre de caída.

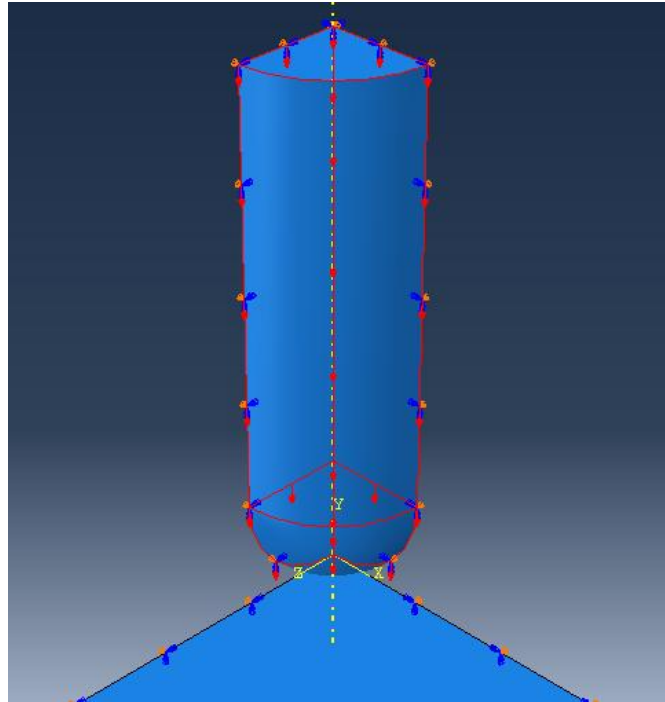


Figura 28: Representación del movimiento del impactador.

Además, para poder simplificar por simetría como se ha explicado anteriormente es necesario aplicar ciertas condiciones que a continuación se detallan:

- Simetría en el plano perpendicular a Z: Se restringe el movimiento a lo largo del eje Z, además de los giros en X e Y.
- Simetría en el plano perpendicular a X: Se restringe el movimiento a lo largo del eje X, además de los giros en Z e Y.

En las zonas externas del laminado, donde no se ha efectuado el corte para simplificar por simetría, se establece el empotramiento o encastre como condición de contorno. Limita cualquier desplazamiento en cualquiera de las direcciones paralelas a su plano. En la Figura 29 se observa la representación de dichas condiciones.

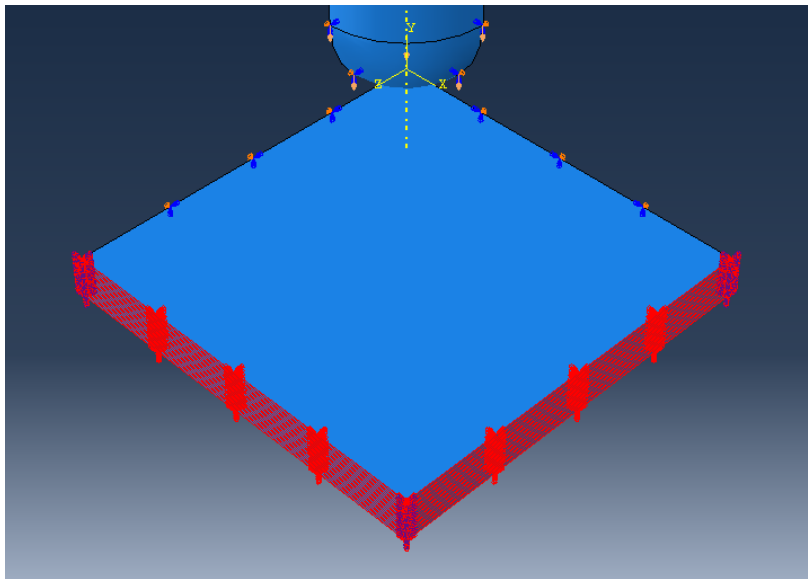


Figura 29: Representación de las condiciones de contorno en el laminado.

### 3.6 MALLADO

Para la simulación de cada uno de los casos se ha llevado a cabo un proceso de mallado con un tamaño de malla de 0,5 mm en el laminado, puesto que este tamaño cumple con las restricciones para la subrutina mencionada. Esta homogeneidad en la malla reproduce con mayor exactitud el impacto, evitando que se generen problemas en las uniones de dichos elementos. En la Figura 30 se muestra la malla empleada para todo el conjunto.

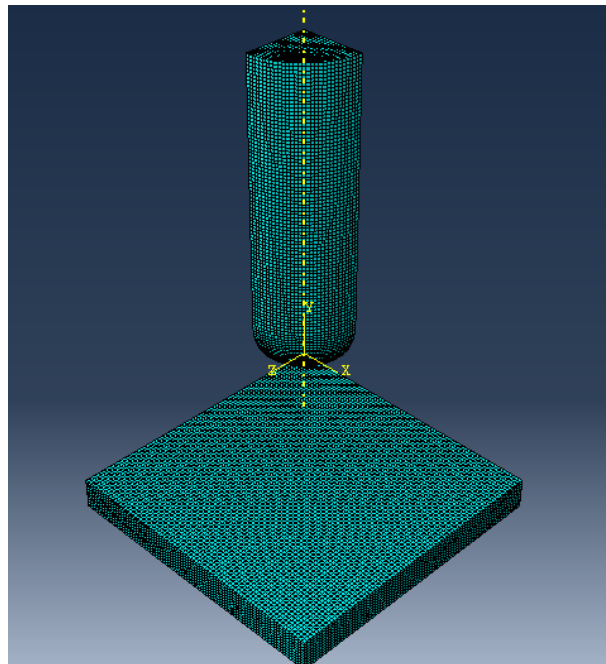


Figura 30: Mallado del conjunto

### 3.7 CONDICIONES DE SIMULACIÓN

Para este problema en el que el objetivo es verificar cómo evoluciona algún parámetro para distintos casos de simulación, se deben lanzar varios casos para cada uno de los cuales existen unas condiciones iniciales. En este trabajo se estudia la influencia de la masa en impactos a baja velocidad, utilizándose tres proyectiles distintos cuyas masas ya han sido especificadas anteriormente. Para analizar correctamente esta influencia se hará planteando casos equienergéticos. Para este modelo, se asume que la totalidad de la energía del impactador es cinética, puesto que puede despreciarse la potencial al iniciar prácticamente en el impacto. Por tanto, las condiciones iniciales se establecen a partir de la ecuación fundamental de la energía cinética:

$$E_c = \frac{m \cdot v^2}{2}$$

Como bien se introdujo en capítulos anteriores, se va a analizar lo que sucede para casos a distintas energías, lo que provoca que para cada energía de impacto y cada

masa del proyectil se tenga una condición inicial distinta. En la Tabla 11 se resumen las velocidades de impacto introducidas para cada uno de los casos.

<b>Masa proyectil [kg]</b>	<b>Energía de impacto [J]</b>	<b>Velocidad de impacto [m/s]</b>
<b>3,8</b>	10	2,29
<b>3,8</b>	30	3,96
<b>3,8</b>	50	5,11
<b>7,8</b>	10	1,60
<b>7,8</b>	20	2,29
<b>7,8</b>	30	2,77
<b>7,8</b>	60	3,96
<b>15,8</b>	10	1,13
<b>15,8</b>	30	1,95
<b>15,8</b>	50	2,52
<b>15,8</b>	60	2,76

**Tabla 11: Condiciones de impacto para cada uno de los proyectiles.**

Además de la velocidad de impacto introducida como “Predefined Field”, se debe también definir el tiempo que dura el impacto en el módulo STEP. Se ha introducido un tiempo de simulación para los casos de mayor energía de impacto de 15 milisegundos, garantizando con él que el sistema ha quedado estabilizado una vez que ha finalizado el impacto y se pueden entonces analizar todas las variables correctamente.

Sin embargo, para los impactos de menor energía se ha reducido el tiempo de la simulación, puesto que el impacto dura menos y de esta manera se produce un ahorro de coste computacional. De esta forma, para impactos de 10 Julios se ha llevado a cabo durante un tiempo de 7 milisegundos, para 30 Julios han sido durante 8 milisegundos y para 50 Julios durante 11.

## **4. RESULTADOS**



## 4.1 INTRODUCCIÓN A LOS RESULTADOS

Como se ha explicado anteriormente, el principal objetivo de este estudio es analizar la influencia de la masa del proyectil que impacta en el laminado de material compuesto en casos equienergéticos. Para ello se muestran los resultados de las simulaciones dependiendo de la energía de impacto variando la masa del impactador. El estudio se centra en la comparación de fuerzas máximas de impactos, desplazamientos máximos en el laminado, energía absorbida y disipada y tiempo de contacto entre otras variables.

## 4.2 ANÁLISIS DE VARIABLES

El primer resultado interesante sobre el que hacer hincapié es el área delaminada y el análisis sobre los daños en el laminado. Tras el impacto se ha observado cómo la zona más dañada es lógicamente la más próxima al lugar donde ha tenido lugar el contacto con el proyectil. Además, el daño aparece en las láminas y cohesivos superiores de forma más destacada. En las siguientes figuras (Figura 31, Figura 32 y Figura 33) se observa el resultado de las zonas afectadas tras el impacto en lo que al cohesivo y al fallo interlaminar se refiere. Para ello se muestra la variable SDEG en los cohesivos.

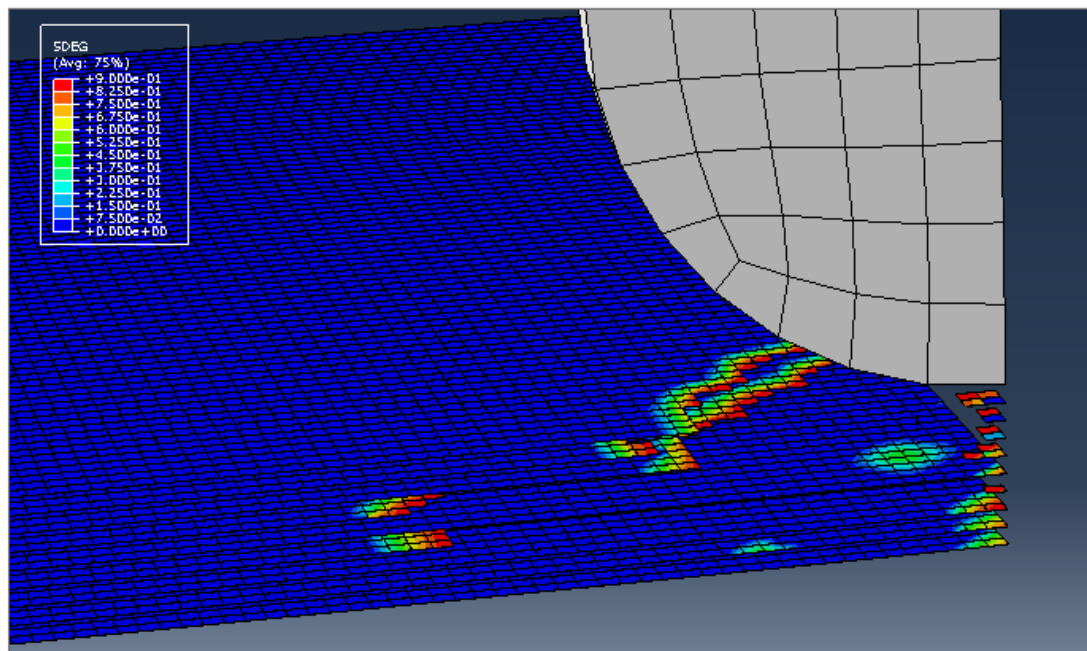


Figura 31: Área delaminada para el proyectil de 3,8 kg

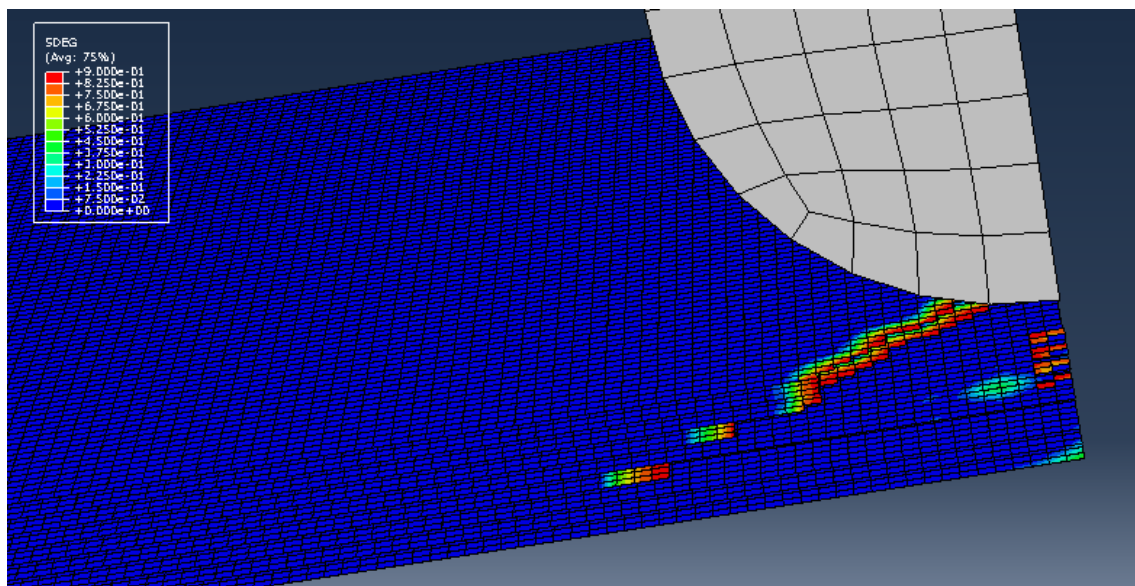


Figura 32: Área delaminada para el proyectil de 7,8 kg

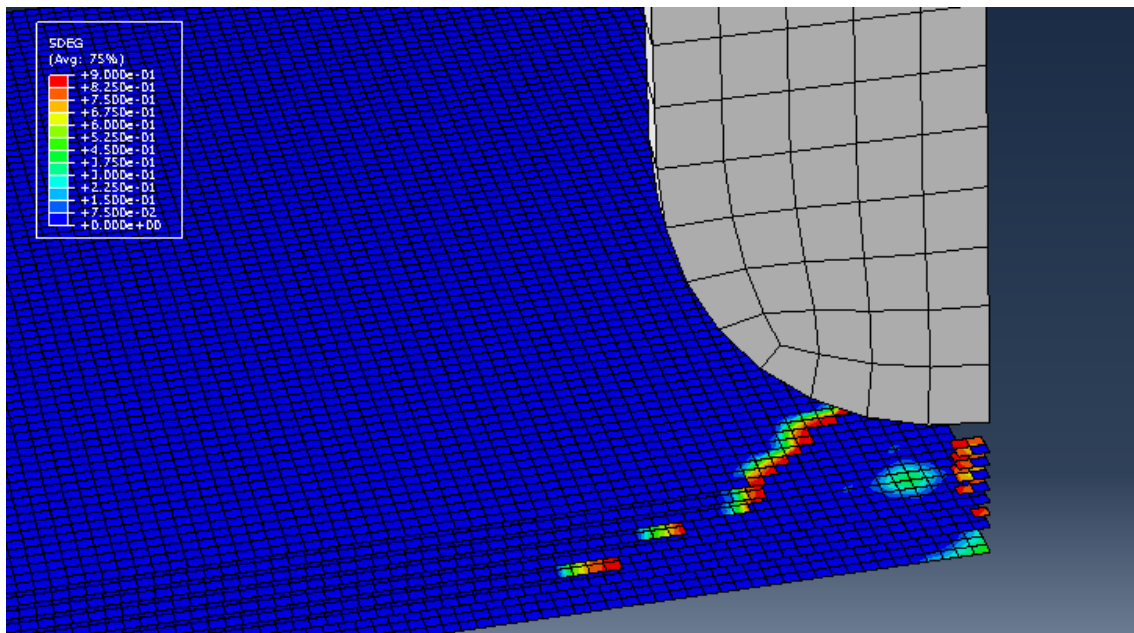


Figura 33: Área delaminada para el proyectil de 15,8 kg

Como se puede observar, las tres zonas afectadas son exactamente iguales, con muy pocas diferencias. Se observa una zona dañada alrededor de la zona donde contacta el proyectil con la lámina. El resultado en este caso es claro: para la misma energía de impacto, el área delaminada es prácticamente idéntica tanto para el proyectil de 3,8 kg como los de 7,8 y 15,8 kg. Por tanto, no se observa influencia de la masa en este sentido.

Experimentalmente J.A. Artero Guerrero, J. Pernas Sánchez et al [1] aportaron la misma conclusión para distintos espesores de laminados. Su interés residía de igual manera en estudiar todos los parámetros que aparecían en el impacto y cómo se comportaba el laminado para cada uno de los impactadores. Por otro lado, Zabala H., Aretxabaleta L. et al [28] indujeron la idea opuesta y observaron como el área delaminada aumentaba en función de la masa para impactos equienergéticos. Las diferencias obtenidas entre los resultados de esta simulación numérica y el estudio recientemente citado reside en el rango de energías de impacto en él empleadas (de 4 a 8 Julios). Para bajas energías de impacto no se inducen delaminaciones y es por eso por lo que ellos observaron cierta dependencia de la masa.

Por otro lado, en el impacto sobre el laminado se genera una fuerza cuya evolución se analiza a continuación como primera variable de estudio. En la Tabla 12 y en la Figura 34 se muestran los valores de la fuerza máxima obtenidos en cada uno de los impactos.

<b>Masa proyectil [kg]</b>	<b>Energía de impacto [J]</b>	<b>Fuerza máxima [N]</b>
<b>3,8</b>	10	8901,95
<b>3,8</b>	30	11316,96
<b>3,8</b>	50	11549,39
<b>7,8</b>	10	8914,78
<b>7,8</b>	20	10459,18
<b>7,8</b>	30	11168,43
<b>7,8</b>	60	11923,55
<b>15,8</b>	10	8839,1
<b>15,8</b>	30	11293,27
<b>15,8</b>	50	11421,87
<b>15,8</b>	60	11023,98

**Tabla 12: Resultados Fuerza Máxima.**

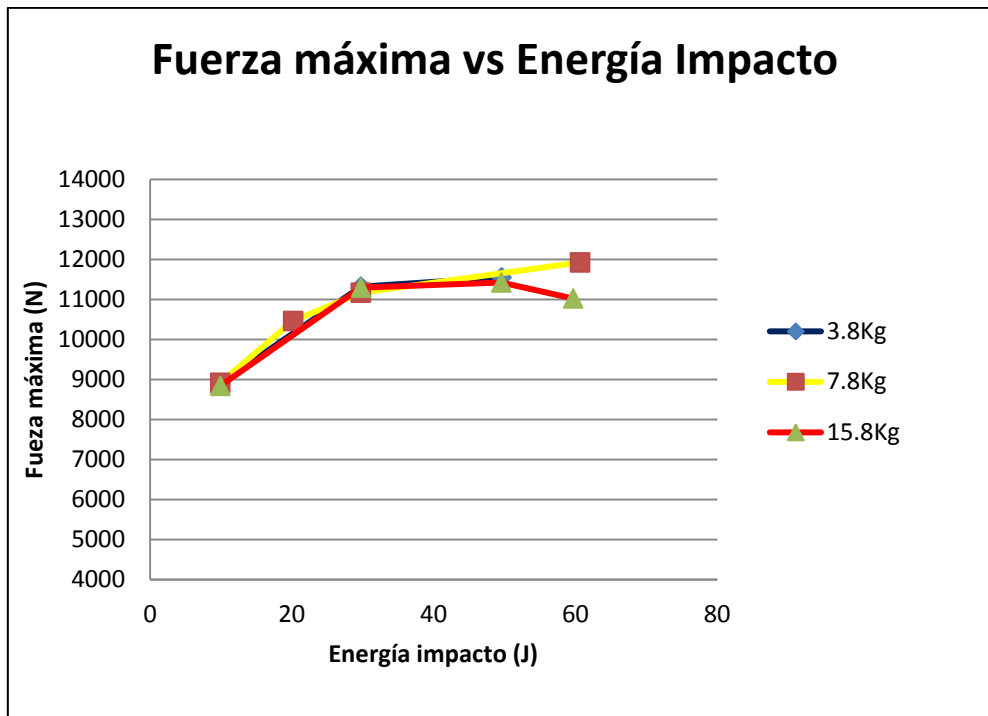


Figura 34: Representación resultados Fuerza Máxima.

Como se puede observar, la tendencia de evolución general de la fuerza máxima en función de la energía de impacto es ascendente. A medida que aumenta la energía, lo hace también la fuerza máxima sobre la lámina. Esta afirmación resulta cuando menos coherente. Además se puede observar cómo los valores de la fuerza máxima para cada proyectil son similares en cada caso equienergético, lo que comienza a inducir la idea de que la fuerza máxima no depende de la masa que impacta en el material. Por otro lado, se ve cómo a partir de los 30 Julios la pendiente en los tres casos es más ligera y la recta comienza a estabilizarse. Esto es debido a que para bajas energías no se ha producido delaminación o rotura de fibra todavía, mientras que a 30 J comienzan a manifestarse. La consecuencia de esta aparición de delaminaciones y roturas de fibras es una tendencia de crecimiento lineal casi constante de la fuerza máxima, como concluyen en otros estudios [28].

Esta idea fue también planteada por J.A. Artero Guerrero, J. Pernas Sánchez et al [1]. Para el caso de la fuerza máxima emplearon probetas de 20 y 30 láminas. Para cada uno de los casos llegaron a la misma conclusión que la comentada recientemente.

De esta manera es posible afirmar a partir del resultado de la simulación numérica que para la fuerza máxima no se observa dependencia alguna de la masa que impacta en el laminado para casos equienergéticos.

El siguiente parámetro de interés reside en el desplazamiento del material tras el impacto. Las condiciones de contorno impuestas provocan que este parámetro sea de interés en la zona alrededor del impacto al ser ésta donde el desplazamiento es mayor. En la Tabla 13 y Figura 35 se exponen los resultados de los desplazamientos máximos en cada uno de los casos simulados.

<b>Masa proyectil [kg]</b>	<b>Energía de impacto [J]</b>	<b>Desplazamiento máximo [mm]</b>
<b>3,8</b>	10	2,029
<b>3,8</b>	30	4,088
<b>3,8</b>	50	6,423
<b>7,8</b>	10	2,032
<b>7,8</b>	20	3,16
<b>7,8</b>	30	4,048
<b>7,8</b>	60	7,944
<b>15,8</b>	10	2,03
<b>15,8</b>	30	4,1
<b>15,8</b>	50	6,53
<b>15,8</b>	60	7,82

**Tabla 13: Desplazamientos verticales máximos del laminado tras el impacto.**

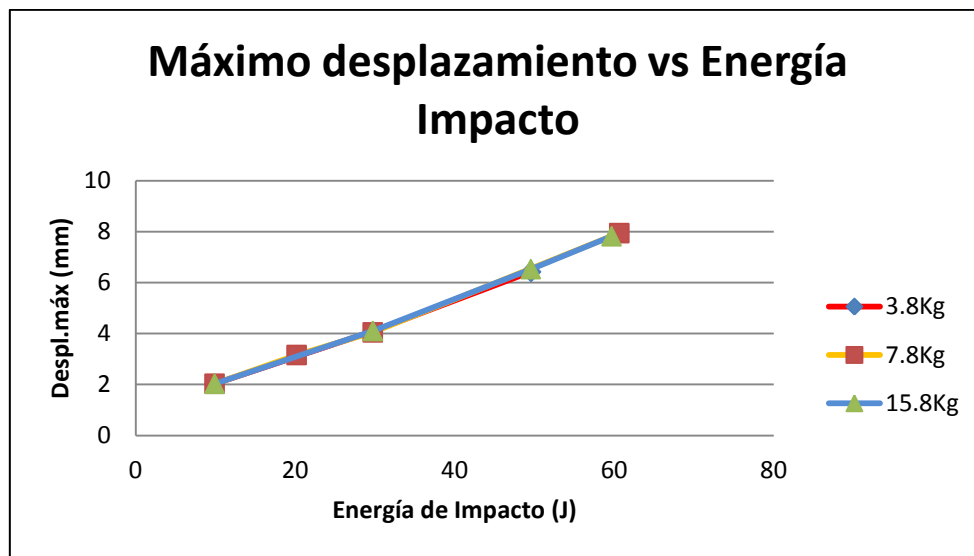


Figura 35: Representación desplazamientos verticales máximos del laminado tras el impacto.

El desplazamiento máximo en el laminado sigue una tendencia ascendente, como es lógico. A mayor energía de impacto y por tanto mayor velocidad de impacto, mayor es el desplazamiento. Sin embargo, resulta interesante observar que para impactos equienergéticos con distintas masas el desplazamiento es exactamente el mismo. La progresión de las tres representaciones para cada uno de los impactadores parece un calco, emergiendo de nuevo la idea de la no influencia de dicho parámetro en el impacto.

J.A. Artero Guerrero, J. Pernas Sánchez et al [1] demostraron experimentalmente la misma idea, la progresión de la curva permite inducir la independencia de la masa impactadora.

Por otro lado, resulta interesante plantear un estudio energético para ver cómo influye aquí la masa. Para ello se utiliza un parámetro adimensional, definido como COR (Coefficient Of Restitution), que ya utilizaron algunos autores en programas de impactos [29]. Se define como el ratio entre la velocidad final y la velocidad inicial después de una colisión. Aplicado a términos energéticos se puede también expresar en función de las energías de impacto y disipada. Su ecuación es de la forma:

$$COR = \sqrt{\frac{E_i - E_D}{E_i}}$$

Donde  $E_i$  es la energía de impacto y  $E_D$  es la energía disipada. El COR siempre oscila entre 0 y 1, donde 1 sería un choque perfectamente elástico. Sin embargo, pocas veces se consigue dicho valor, debido a la deformación plástica obtenida o el calor disipado entre otras causas. Para los valores de energía de impacto empleados en el ensayo, que oscilan entre 10 y 60 J se han obtenido los datos que se expresan en la Tabla 14.

Masa proyectil [kg]	Energía de impacto [J]	Energía disipada [J]	COR
3,8	10	3,624	0,797
3,8	30	20,130	0,569
3,8	50	39,800	0,445
7,8	10	3,574	0,800
7,8	20	8,520	0,760
7,8	30	15,250	0,698
7,8	60	49,070	0,437
15,8	10	3,430	0,809
15,8	30	16,530	0,667
15,8	50	38,690	0,468
15,8	60	49,600	0,411

Tabla 14: Datos energía disipada y COR para cada uno de los casos de estudio.

Y representando sus valores en la Figura 36 se puede observar su tendencia descendente.



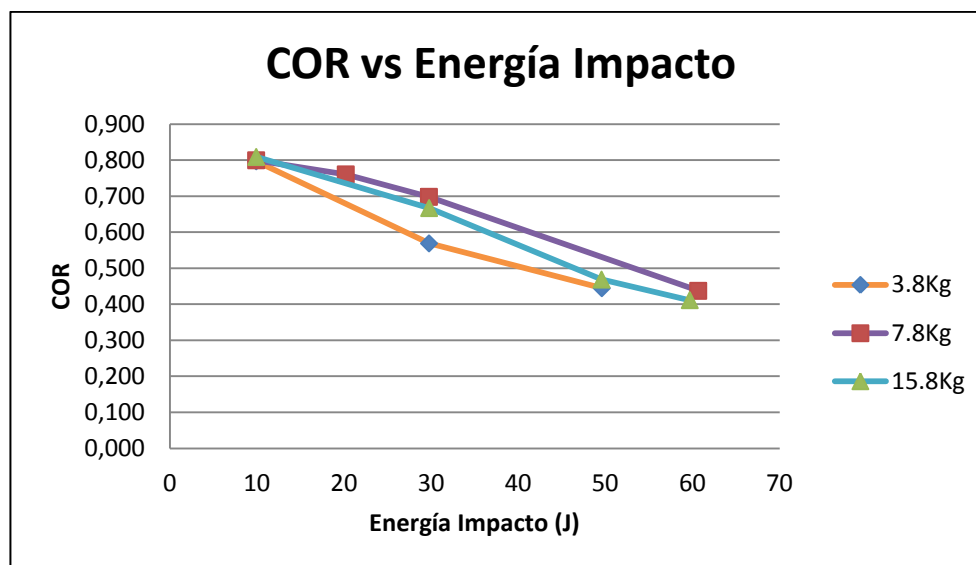


Figura 36: Representación del COR para cada uno de los casos de estudio.

De la representación de la Figura 35 se puede llegar a varias conclusiones a partir de algunas deducciones. En primer lugar, es obvio comentar que la tendencia de la evolución del COR siempre es descendente. Es evidente que si aumenta la energía de impacto también lo hacen las delaminaciones o fallos en las fibras. Esto se traduce en una mayor disipación de energía a través de ellas. Por tanto, cuanto mayor es la energía de impacto mayor es también la energía disipada y menor es el COR. En el trabajo de J.A. Artero Guerrero, J. Pernas Sánchez et al [1] se observa el mismo fenómeno.

De esta manera se vuelve a corroborar que aparece otro parámetro para el que no existe influencia de la masa. En el caso estudiado se tiene que el COR para una energía de impacto de 10 J toma en todos los casos un valor de aproximadamente 0,8. Esto hace indicar que para el laminado modelizado aparece a bajas energías el fallo interlaminar, provocando una disipación de energía a través del mismo que genera un COR inferior a la unidad.

Otro parámetro de interés es el tiempo de contacto del impactador con la lámina. En la Tabla 15 y en la Figura 37 se observa cómo a medida que aumenta la energía de impacto también lo hace el tiempo de contacto. Esto es debido a que el daño en la lámina se hace cada vez más grande.

Masa proyectil [kg]	Energía de impacto [J]	Tiempo de contacto [msec]
3,8	10	3
3,8	30	4,18
3,8	50	5,28
7,8	10	4,2
7,8	20	4,8
7,8	30	5,43
7,8	60	8,2
15,8	10	6,31
15,8	30	7,81
15,8	50	10,6
15,8	60	12,8

Tabla 15: Tiempo de contacto de cada impacto.

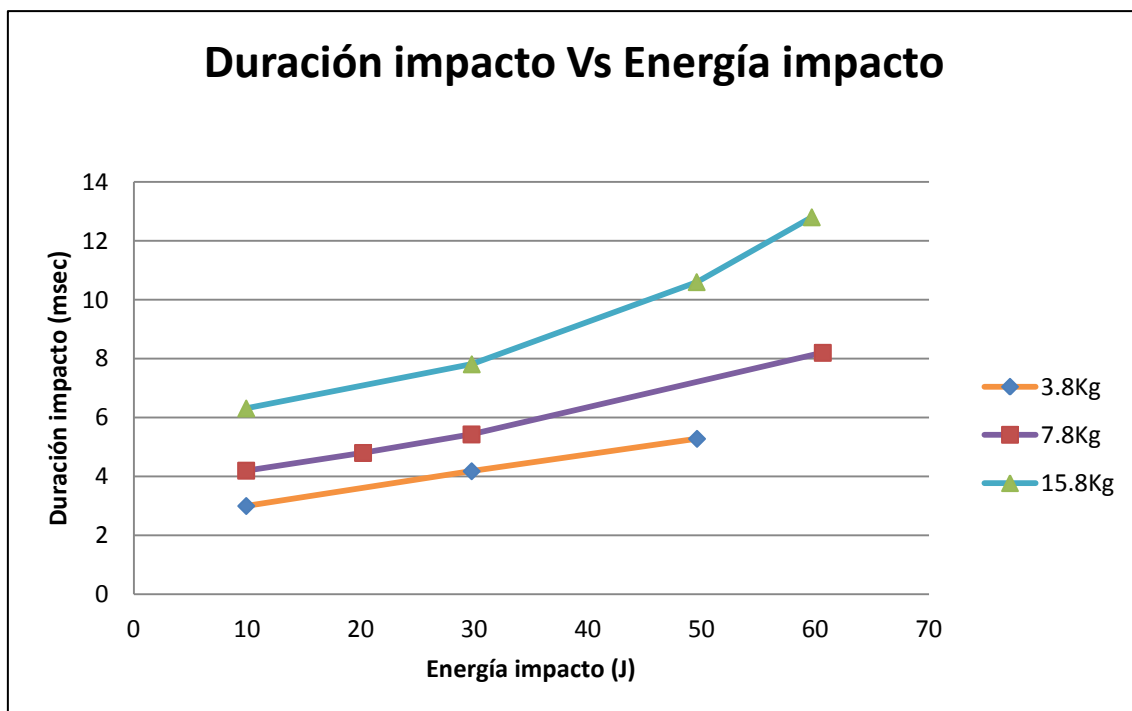


Figura 37: Tiempo de contacto entre el impactador y el laminado.

## 5. CONCLUSIONES

El principal objetivo de este trabajo se centra en el análisis de impactos a baja velocidad contra laminados de tejido de material compuesto. El interés principal reside en analizar la influencia de la masa del proyectil en el impacto a partir del estudio de las principales variables y analizar los cambios en ellas, puesto que la evolución del daño inducido en las fibras aporta gran cantidad de información para el estudio. Para poder llevarlo a cabo se ha desarrollado un modelo numérico que reproduce el impacto de 11 casos distintos, con diferentes energías de impacto y distintas masas impactadoras para poder llegar a las conclusiones a continuación expuestas:

- Se puede afirmar que no se observa influencia alguna de la masa del proyectil en el comportamiento del laminado impactado, para casos equienergéticos y tras la aparición de delaminación. Se ha visto que para los impactos a una determinada energía, con cualquiera de los 3 impactadores utilizados se obtiene prácticamente el mismo área delaminada. También sucede lo mismo con la fuerza máxima, desplazamiento máximo o COR, y son sólo función de la energía de impacto y no de la velocidad de impacto y la masa por separado.
- Se ha observado cómo para impactos de mayor energía los valores pico son mayores: aparece una fuerza máxima superior que para los casos con una energía de impacto menor. Lo mismo sucede con el desplazamiento máximo del laminado en dirección vertical. El COR es menor a medida que aumenta la energía de impacto, debido a la gran cantidad de energía disipada a través de las delaminaciones.

Algunos autores han observado una influencia de la masa del impactador [28] en el área delaminada para un ensayo de impacto en laminados carbono/epoxy para casos en los que el daño interlaminar es dominante, atribuyendo dicha influencia a la tenacidad y la sensibilidad del material en la deformación en la fractura interlaminar.

Cuando, por el contrario, es el fallo intralaminar el que aparece, se ha demostrado de igual manera la no influencia del parámetro de la masa en el impacto en igualdad de condiciones energéticas [32]. Esta diferencia viene determinada por la aproximación que se hace de la velocidad de deformación como:

$$\dot{\varepsilon} = \frac{v}{L}$$

Donde  $v$  es la velocidad de impacto y  $L$  es la longitud característica. Para la tenacidad en el fallo interlaminar se tiene que la longitud característica está asociada al espesor, mientras que para evaluar la resistencia de las fibras a tracción se toma como longitud característica la extensión del laminado. Esto explica que la tasa de deformación asociada a la fractura de fibra es por lo menos un orden de magnitud menor que la asociada a la tenacidad en la fractura.

Por otro lado, J.A. Artero Guerrero, J. Pernas Sánchez et al [1] demuestran experimentalmente las conclusiones expuestas anteriormente. Ellos utilizan dos tipos de laminados, de 20 y 30 capas y varían el espesor. Los resultados que obtienen permiten también afirmar que no existe dependencia alguna de la masa en la evolución de las variables del daño.

## 6. TRABAJOS FUTUROS

A continuación se exponen algunas de las posibles modificaciones a este trabajo que pueden utilizarse en trabajos estudios como complementación a las conclusiones aquí obtenidas:

- Ampliar el modelo para laminados de distintos espesores, observando cómo varían la fuerza máxima, el COR o el desplazamiento máximo entre esos laminados pero se vuelve a corroborar la independencia de la masa en igualdad de energía de impacto para todos los espesores.
- Utilizar distintos impactos con diferentes trayectorias, no siempre un impacto vertical puro que se asemeje al que tiene lugar en una torre de caída, pudiendo también variar las condiciones de contorno.
- Modelizar el laminado de una forma más real, añadiendo un mayor número de láminas y de cohesivos.
- Modificar las propiedades del cohesivo y de la lámina, teniendo así casos en los que se pueda verificar la hipótesis planteada para distintos tipos de material.
- Realizar un análisis numérico sensible a la velocidad de deformación y corroborar de igual manera que la masa no tiene influencia en los resultados, siendo sólo determinante cuando únicamente aparece el fallo interlaminar.

## 7. BIBLIOGRAFÍA



- [1] J.A. Artero Guerrero, J. Pernas Sánchez, J. López Puente, D. Varas; Experimental Study of the impactor mass effect on the low velocity impact of carbon/epoxy woven laminates.
- [2] Antonio Miravete; Materiales compuestos I; 2000
- [3] Donald R. Askeland; Ciencia e ingeniería de los materiales; 2001
- [4] Franco Stupenengo; Materiales y materias primas; 2011
- [5] N. Martinez Mateos, D. Busquets Mataix, M.D. Salvador Moya, V. Amigó Borrás; Propiedades mecánicas de compuestos de matriz de aluminio con partículas cerámicas, obtenidos por extrusión de polvos; Universidad Politécnica Valencia; 2002
- [6] Shirley Kalamis García Castillo; Análisis de laminados de materiales compuestos con precarga en su plano sometidos a impacto; 2007; Tesis Doctoral UC3M
- [7] [www.hexcel.com](http://www.hexcel.com)
- [8] Plataforma Aeroespacial española; Armonización de las actividades en materiales compuestos para aeronáutica y espacio en España; Grupo de Vigilancia Tecnológica; 2010
- [9] Francisco Mata Cabrera; Utilización de composites de matriz polimérica en la fabricación de automóviles; 2004.
- [10] A. Diego Villalón, J.P. Gutiérrez Jiménez, A. Arteaga Irriarte, C. López Hombrados; Utilización de materiales compuestos en la construcción de nuevos puentes.
- [11] test-systems.es
- [12] Navarro C., Simplified modelling of the ballistic behavior of fabrics and fibre-reinforced polymeric matrix composites, Key Engineering Materials, 1998.
- [13] Robinson P, Davies G., Impactor mass and specimen geometry effects in low velocity impact of laminated composites, Int J Impact Eng. 1992.

[14] Abrate S., Impact of Composite Structures, Cambridge University Press, UK, 1998

[15] Henkhaus K., Overview of research on composite materials impact behavior, 16<sup>th</sup> Engineering Mechanics Conference, 2003

[16] López-Puente J, Zaera R, Navarro C., An analytical model for high velocity impacts on thin CFRPs woven laminated plates, International of Journal of solid and Structures, 2007.

[17] Cantwell W., Morton J., Impact perforation of carbon fibre reinforced plastic, Compos. Sci. Technol., 1990.

[18] T. Børvik, O. S. Hopperstad, T. Berstad, and M. Langseth, "Perforation of 12mm thick steel plates by 20mm diameter projectiles with flat, hemispherical and conical noses: part II: numerical simulations," Int. J. Impact Eng., vol. 27, no. 1, 2002.

[19] T. Børvik, M. Langseth, O. S. Hopperstad, and K. A. Malo, "Perforation of 12mm thick steel plates by 20mm diameter projectiles with flat, hemispherical and conical noses: part I: experimental study," Int. J. Impact Eng., vol. 27, no. 1, 2002.

[20] A, Castellanos, M, Martínez y M. Arias, "Simulación numérica del impacto de un proyectil de cabeza plana sobre una placa de acero AISI 4340 empleando métodos de discretización Lagrange-Lagrange y Lagrange-SPH" Febrero 2015.

[21] Caprino G., Viconti IC., Ilio AD. Composite materials response under low-velocity impact, Compos. Struct, 1984

[22] Cantwell W., Morton J., Comparison of the low and high velocity impact response of CFRP. Compos. Struct. 1989

[23] Cantwell W., Curtis P., Morton J., An assessment of the impact performance of CFRP reinforced with high-strain carbon fibres. Compos. Sci Technol., 1986.

[24] Pavier M., Clarke M., Experimental techniques for the experimentation of the effects of impact damages on carbon-fibre composites. c., 1995.

[25] Jackson W., Poe C., The use of impact force as scale parameter for the impact response of composite laminates, J. Compos. Technol. Res, 1993.

[26] Bejerano R., Influencia de la geometría del percutor en impactos de baja velocidad sobre laminados de material compuesto, 2011.

[27] Comportamiento de componentes estructurales bajo cargas impulsivas, Departamento de Mecánica de Medios Continuos, Universidad Carlos III de Madrid.

[28] Zabala H., Aretxabaleta L., Castillo G., Urien J., Aurrekoetxea J., Impact velocity effect on the delamination of woven carbón-epoxy plates subjected to low velocity equienergetic impact loads. Compos. Sci Technol. 2014

[29] Feraboli P., Kedward KT., A new composite structure impact performance assessment program, Compos. Sci Technol., 2006.

[30] V. Criado del Álamo, “Estudio analítico y numérico de laminados de material compuesto sometidos a impactos a baja velocidad” Universidad Carlos III de Madrid, Leganés, 2015.

[31] DASSAULT SYSTEMES SIMULIA, VUMAT for Fabric Reinforced Composites.

[32] Foroutanb R, Nemesa J, Ghiasib H, Hubertb P. Experimental investigation of high strain-rate behaviour of fabric composite.. Compos Struct, 2013.

[33] J.M. Goicolea, “Estructuras sometidas a impacto” Universidad Politécnica de Madrid.

[34] J. Reboul “Modelización numérica del comportamiento de un material compuesto de tejido de fibra de carbono y matriz epoxi ante cargas dinámicas” Universidad Carlos III de Madrid. Leganés 2012.

[35] J. Fernández “Simulación numérica de ensayos balísticos sobre laminados de fibra” Universidad Carlos III de Madrid. Leganés 2014.

[36] D. Illescas “Simulación de un choque frontal de un vehículo contra distintos tipos de barrera” Universidad Carlos III de Madrid. Leganés, 2009.

[37] L. Arronche, V. La Saponara, I. Martínez Ramírez, E. Ledesma Orozco, M. Ernesto Gutiérrez Rivera, M. Torres Cisneros “Análisis numérico-experimental de desempeño de compuesto híbrido bajo impacto” Mechanical and Aerospace Engineering, University of California. Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad de Guanajuato. Sept. 2012.

[38] R.J. Barrios, I. Iturrioz, A.P. Csilino, L. Fasce, P.M. Frontini, “Simulación numérica del ensayo de impacto en probetas de polímeros utilizando el método de los elementos discretos”